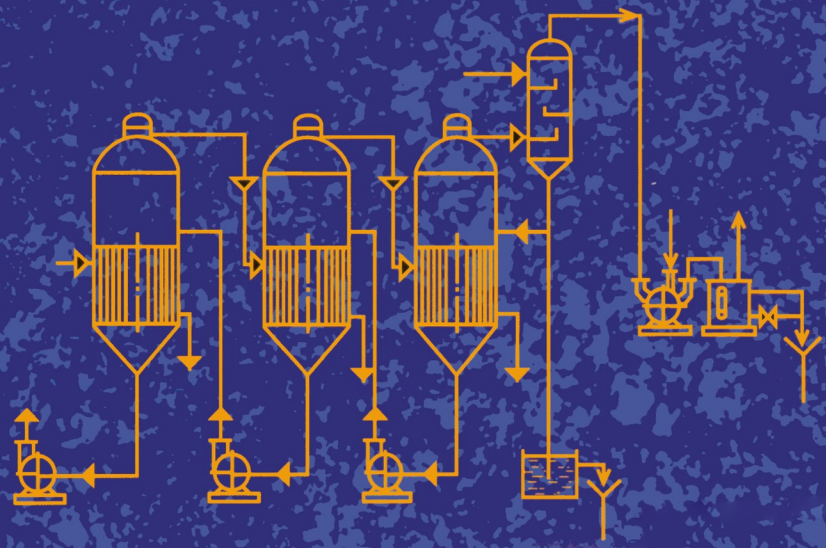
• Alfredas Balandis • Benonas Leskauskas
• Giedrius Vaickelionis • Zenonas Valančius

CHEMIJOS INŽINERIJA

III knyga



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

SILIKATŲ TECHNOLOGIJOS KATEDRA

**Alfredas BALANDIS, Benonas LESKAUSKAS,
Giedrius VAICKELIONIS, Zenonas VALANČIUS**

CHEMIJOS INŽINERIJA

III knyga

Mokomoji knyga

Scanned by
Cloud Dancing

TECHNOLOGIJA
KAUNAS • 2010

Recenzavo:
doc. dr. S. Kitrys (Kauno technologijos universitetas)
vyr. m. b. dr. R. Levinskas (Lietuvos energetikos institutas)

Knyga yra skirta KTU Cheminės technologijos fakulteto studentams, studijuojantiems modulius **Chemijos inžinerija 1** ir **Chemijos inžinerija 2**. Joje pateiktos pagrindinės skaičiavimams reikalingos teorinės priklausomybės bei lygtys, jų taikymo sąlygos, skaičiavimų pavyzdžiai, kontroliniai uždaviniai ir skaičiavimams reikalinga žinynų medžiaga.

Be raštiško leidyklos „Technologija" sutikimo nė viena šios knygos dalis jokiais tikslais ir jokiomis priemonėmis neturi būti kopijuojama.

© A. Balandis, B. Leskauskas, G. Vaickelionis, Z. Valančius, 2010
© Leidykla „Technologija", 2010

ISBN 978-9955-25-805-6

TURINYS

1 DALIS. **HIDRODINAMIKA** 4
1.1. Pagrindiniai dėsningumai ir skaičiavimų lygtys 4
1.2. Uždavinių sprendimo pavyzdžiai 16
1.3. Kontroliniai uždaviniai 36
2 DALIS. **NEVIENALYTĖS SISTEMOS** 43
2.1. Pagrindiniai dėsningumai ir skaičiavimų lygtys 43
2.2. Uždavinių sprendimo pavyzdžiai 49
2.3. Kontroliniai uždaviniai 57
3 DALIS. **ŠILUMOS MAINAI** 60
3.1. Pagrindiniai dėsningumai ir skaičiavimų lygtys 60
3.2. Uždavinių sprendimo pavyzdžiai 68
3.3. Kontroliniai uždaviniai 80
4 DALIS. **GARINIMAS** 84
4.1. Pagrindiniai dėsningumai ir skaičiavimų lygtys 84
4.2. Uždavinių sprendimo pavyzdžiai 89
4.3. Kontroliniai uždaviniai 99
5 DALIS. **MASĖS MAINŲ PAGRINDAI. ABSORBCIJA** 101
5.1. Masės mainų pagrindiniai dėsningumai ir skaičiavimų lygtys 101
5.2. Absorbcijos pagrindiniai dėsningumai ir skaičiavimų lygtys 107
5.3. Uždavinių sprendimo pavyzdžiai 112
5.4. Kontroliniai uždaviniai 122
6 DALIS. **DŽIOVINIMAS** 126
6.1. Pagrindiniai dėsningumai ir skaičiavimų lygtys 126
6.2. Uždavinių sprendimo pavyzdžiai 136
6.3. Kontroliniai uždaviniai 147
PRIEDAI 152
LENTELĖS 152
NOMOGRAMOS 176
LITERATŪRA 180

1 dalis. HIDRODINAMIKA

Hidraulika yra mokslas, nagrinėjantis įvairių skysčių pusiausvyrą ir judėjimą. Hidraulika skirstoma į hidrostatiką, nagrinėjančią skysčių pusiausvyrą saute, ir hidrodinamiką, nagrinėjančią skysčių judėjimo dėsnius. Skysčius, dujas ir garus įprasta vadinti skysčiais, nes kai srauto greičiai gerokai mažesni už garso greitį, skysčių judėjimo dėsningumai tinka dujų ir garų judėjimui. Todėl dažnai skysčiais bus vadinamos medžiagos, gebančios tekėti. Hidraulikos dėsniams išvesti vartojama idealaus skysčio sąvoka. Tai absoliučiai nespūdus, neklampus skystis, kurio tankis, kintant temperatūrai ir slėgiui, išlieka pastovus. Realūs skysčiai būna lašeliniai ir tamprūs (dujos ir garai). Lašelinius skysčius galima laikyti nespūdžiais, jų tūrinio plėtimosi koeficientas labai mažas.

Šiame skyriuje nagrinėjami skysčio (dujų) judėjimo dėsningumai ir jų taikymas skaičiuojant bendruosius technologinius procesus ir aparatus.

1.1. Pagrindiniai dėsningumai ir skaičiavimų lygtys

1. Dujų tankis ρ, esant temperatūrai T ir slėgiui p, apskaičiuojamas pagal Klapeirono lygtį:

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{T_0 \cdot p}{T \cdot p_0} = \frac{M}{22{,}4} \cdot \frac{273 \cdot p}{T \cdot p_0}\ ; \qquad (1.1)$$

čia $\rho_0 = M/22{,}4$ kg/m^3 – dujų tankis normaliomis sąlygomis (T_0 = 273 K, $p_0 = 1{,}013 \cdot 10^5$ Pa); M – dujų molio masė, kg/kmol; T – absoliutinė temperatūra, K; p – absoliutusis slėgis, Pa.

Dujų mišinio tankis:

$$\rho_{miš} = y_1 \cdot \rho_1 + y_2 \cdot \rho_2 + \ldots + y_m \cdot \rho_m\ ; \qquad (1.2)$$

čia $y_1, y_2, \ldots, y_n$ – dujų mišinio atskirų komponentų kiekis mišinyje tūrio dalimis; $\rho_1, \rho_2, \ldots, \rho_n$ – atitinkamų komponentų tankiai, kg/m^3.

2. Nesimaišančių skysčių tankis apytiksliai apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$\frac{1}{\rho_{miš}} = \frac{x_1}{\rho_1} + \frac{x_2}{\rho_2} + \cdots + \frac{x_n}{\rho_n}\ ; \qquad (1.3)$$

čia $x_1, x_2, \ldots, x_n$ – mišinio atskirų komponentų kiekis masės dalimis; $\rho_{miš}, \rho_1, \rho_2, \ldots, \rho_n$ – mišinio ir atitinkamų komponentų tankiai, kg/m^3.

Iš (1.3) lygties galime išreikšti suspensijos tankį:

$$\frac{1}{\rho_{susp}} = \frac{x}{\rho_k} + \frac{1-x}{\rho_{sk}}\ ; \qquad (1.3a)$$

čia x – kietos fazės kiekis masės dalimis; $\rho_{sus}, \rho_k, \rho_{sk}$ – kietos ir skystos fazės suspensijos komponentų tankiai, kg/m^3.

3. Skysčio (dujų) stulpelio, kurio aukštis h, sunkio jėgos sudaromas slėgis p, Pa, apskaičiuojamas:

$$p = \rho \cdot g \cdot h; \tag{1.4}$$

čia ρ – skysčio tankis; kg/m^3; g – laisvo kritimo pagreitis, m/s^2.

4. Pagrindinė hidrostatikos lygtis nusako slėgį p skysčio sluoksnio gylyje h nuo jo paviršiaus:

$$p = p_0 + \rho \cdot g \cdot h; \tag{1.5}$$

čia p_0 – slėgis į skysčio paviršių, Pa.

Bendro slėgio p sudaroma jėga P, N, į indo dugną F apskaičiuojama pagal lygtį:

$$P = (p_0 + \rho \cdot g \cdot h_s) \cdot F; \tag{1.5a}$$

čia h_s – skysčio stulpelio aukštis, m; F – indo dugno plotas, m^2.

5. Ryšys tarp kinematinės ν, m^2/s, ir dinaminės μ, Pa·s, klampos išreiškiamas tokia priklausomybe:

$$\nu = \mu / \rho.$$

Žinynuose dinaminės klampos μ vertė dažnai pateikiama nesisteminiais vienetais, t. y. centipuazais (cP):

1 cP = 10^{-3} Pa·s.

Skysčių dinaminė klampa μ, esant įvairioms temperatūroms, nustatoma pagal nomogramą, pateiktą I pav. arba žinynuose esančiose lentelėse.

Dujų dinaminės klampos μ vertę galima nustatyti II pav. pateiktoje nomogramoje arba apskaičiuoti pagal 1.8 lygtį:

$$\frac{M_{miš}}{\mu_{miš}} = \frac{y_1 \cdot M_1}{\mu_1} + \frac{y_2 \cdot M_2}{\mu_2} + \cdots + \frac{y_n \cdot M_n}{\mu_n}; \tag{1.6}$$

čia $\mu_{miš}$, μ_1, μ_2 – dujų mišinio ir jo komponentų dinaminės klampos, Pa·s; $M_{miš}$, M_1, M_2 – atitinkamų komponentų molinės masės, kg/kmol; y_1, y_2 – dujų komponentų tūrio dalys mišinyje.

Skaičiuodami dujų mišinio dinaminę klampą μ, galime naudotis ir šia empirine lygtimi:

$$\mu_{miš} = \frac{y_1 \cdot \mu_1 \cdot \sqrt{M_1 \cdot T_{kr1}} + y_2 \cdot \mu_2 \cdot \sqrt{M_2 \cdot T_{kr2}} + \cdots}{y_1 \cdot \sqrt{M_1 \cdot T_{kr1}} + y_2 \cdot \sqrt{M_2 \cdot T_{kr2}} + \cdots}; \tag{1.7}$$

čia T_{kr1}, T_{kr2} – kritinės komponentų temperatūros, K (V lentelė).

Dujų dinaminės klampos μ verčių kitimo priklausomybė nuo temperatūros išreiškiama Saterlendo lygtimi:

$$\mu_t = \mu_0 \cdot \frac{273 + C}{T + C} \cdot \left(\frac{T}{273}\right)^{3/2}; \qquad (1.8)$$

čia μ_0, μ_t – dinaminė klampa, esant 0 °C ir t °C temperatūroms, Pa·s; T – temperatūra, K; C – Saterlendo pastovioji, kurios vertės pateikiamos žinynuose (V lentelė).

6. Neasocijuotų skysčių mišinio dinaminė klampa apskaičiuojama pagal lygtį:

$$lg\mu = x_1 \cdot lg\mu_1 + x_2 \cdot lg\mu_2 + ... + x_n \cdot lg\mu_n \qquad (1.9)$$

čia $\mu_{miš}$, μ_1, μ_2, μ_n – mišinio ir atskirų komponentų dinaminės klampos, Pa·s; x_1, x_2, x_n – komponentų molio dalys mišinyje.

Skysčių mišinio klampa gali būti apskaičiuota ir pagal komponentų tūrines dalis $x_{v,i}$:

$$\frac{1}{\mu_{miš}} = \frac{x_{v1}}{\mu_1} + \frac{x_{v2}}{\mu_2} + \cdots. \qquad (1.10)$$

Praskiestų suspensijų dinaminė klampa μ_{susp} apskaičiuojama pagal atitinkamą lygtį:

- jei kietos fazės koncentracija (pagal tūrį) yra mažesnė kaip 10 %

$$\mu_{sk} \cdot (1+2{,}5 \cdot \varphi),\ \mu_{susp} = \mu_{sk} \cdot (1 + 2{,}5 \cdot \varphi); \qquad (1.11)$$

- esant kietos fazės koncentracijai nuo 10 % iki 30 %

$$\mu_{susp} = \mu_{sk} \cdot \frac{0{,}59}{(0{,}77 - \varphi)^2}, \qquad (1.12)$$

čia μ_{susp}, μ_{sk} – suspensijos ir grynos skystos fazės dinaminė klampa, Pa·s; φ – kietos fazės kiekis suspensijoje, tūrio dalimis.

Žinodami etaloninio skysčio dinaminę klampą, panašios klampos skysčio dinaminę klampą galime apskaičiuoti pasinaudoję K. Pavlovo tiesine priklausomybe:

$$\frac{t_{\mu 1} - t_{\mu 2}}{\theta_{\mu 1} - \theta_{\mu 2}} = K = const; \qquad (1.13)$$

čia $t_{\mu 1}$, $t_{\mu 2}$ – skysčio temperatūros, °C; $\theta_{\mu 1}$, $\theta_{\mu 2}$ – etaloninės medžiagos temperatūros, °C, kurioms esant, etaloninės medžiagos dinaminės klampos yra lygios skysčio dinaminėms klampoms μ_1, μ_2.

7. Tūrio debito lygtis:

$$V_s = w \cdot f \,. \tag{1.14}$$

Masės debito lygtis:

$$G = V_s \cdot \rho = w \cdot f \cdot \rho \,; \tag{1.14a}$$

čia G – masės debitas, kg/s; V_s – sekundinis tūrio debitas, m^3/s; w – vidutinis tėkmės greitis, m/s; f – vamzdžio (aparato) skerspjūvio plotas, m^2; ρ – tekančio skysčio arba dujų tankis, kg/m^3.

Vamzdynų skerspjūvis dažniausiai yra skritulio formos, todėl (1.14) lygtis įgauna tokią išraišką:

$$V_s = 0{,}785 \cdot d^2 \cdot w;$$

čia d – vamzdžio vidinis skersmuo, m.

Debito pastovumo lygtis kintamo skerspjūvio kanalais tekant nespūdiems skysčiams:

$$V_s = w_1 \cdot f_1 = w_2 \cdot f_2 = w_3 \cdot f_3 = const \,. \tag{1.15}$$

Žinant realų tūrio debitą ir tėkmės greitį, vamzdžių skersmuo apskaičiuojamas taip:

$$d = \sqrt{\frac{V_s}{0{,}785 \cdot w}} \,. \tag{1.16}$$

Tais atvejais, kai skystis arba dujos teka ne cilindrinės formos kanalais (kvadrato, stačiakampio ir kt.), yra skaičiuojamas ekvivalentinis skersmuo d_e:

$$d_e = \frac{4 \cdot f}{S};$$

čia S – bendras vilgomasis perimetras skerspjūvyje, m, f – kanalo skerspjūvio plotas, m^2.

8. Pagrindiniai vamzdžiuose ir kanaluose tekančių srautų hidrodinaminio panašumo kriterijai.

Reinoldso kriterijus Re charakterizuoja hidrodinaminį tekėjimo režimą ir išreiškia inercijos ir vidinės trinties jėgų sraute santykį:

$$Re = w \cdot d \cdot \rho / \mu = w \cdot d / \nu \,; \tag{1.17}$$

čia w – srauto greitis, m/s; d – vamzdyno skersmuo, m; ρ – skysčio srauto tankis, kg/m^3; μ – dinaminė klampa, Pa·s; ν – kinematinė klampa, m^2/s.

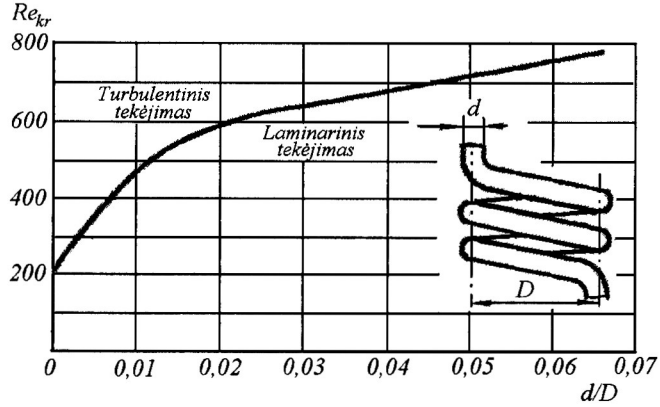
Kai srautas teka tiesiu vamzdžiu, kritinė Reinoldso kriterijaus vertė $Re_{kr} = 2300$;

kai $Re < 2300$, tada tekėjimo pobūdis yra laminarinis;

kai $Re > 10000$, tada tekėjimo pobūdis turbulentinis;

kai $2300 < Re < 10000$, tada tekėjimas yra nestacionarus turbulentinis arba pereinamasis.

Lenktuose vamzdžiuose (gyvatukuose) kritinė Reinoldso skaičiaus vertė yra mažesnė, negu tiesiuose kanaluose ir priklauso ir nuo kanalo kreivumo, t. y. nuo santykio d/D (d – vidinis gyvatuko vamzdžio skersmuo, D – gyvatuko vijos skersmuo). Minėta priklausomybė pateikta 1.1 pav.



1.1 pav. Re_{kr} priklausomybė nuo d/D

Ne skritulio formos skerspjūvio ploto srautams Re išraiškoje statoma ekvivalentinio skersmens vertė.

Frudo kriterijus Fr apibūdina inercijos ir sunkio jėgų sraute santykį:

$$Fr = \frac{w^2}{g \cdot d}; \qquad (1.18)$$

čia g – laisvo kritimo pagreitis, m/s^2.

Eulerio kriterijus Eu nusako sistemos energetinę būseną, t. y. statinio slėgio skirtumo ir inercijos jėgų sraute santykį:

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho \cdot w^2}; \qquad (1.19)$$

čia Δp – slėgių skirtumas, susidaręs nugalint sistemos hidraulinius pasipriešinimus, Pa.

9. Bernulio lygtis idealiems skysčiams ($\mu = 0$):

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{w_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{w_2^2}{2 \cdot g}. \qquad (1.20)$$

Bernulio lygtis realiems skysčiams:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{w_1^2}{2 \cdot g} - h_n = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{w_2^2}{2 \cdot g}; \qquad (1.20a)$$

čia z – geometrinis aukštis, m; $p/(\rho \cdot g)$ – pjezometrinis (statinis) aukštis, m; $w^2/(2 \cdot g)$ – dinaminis aukštis, m; h_n – aukščių nuostoliai, m.

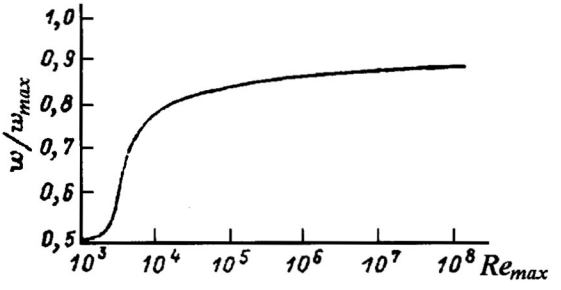
10. Skystį, tekantį vamzdžiais, veikia trinties jėgos, todėl skystis prie sienelių teka lėčiau. Greičių pasiskirstymas vamzdžių skerspjūvyje aprašomas lygtimi:

$$w_{vid} = k \cdot w_{max};$$

čia w_{vid} – skaičiuotinas vidutinis srauto greitis vamzdžio skerspjūvyje, w_{max} – ašinis (maksimalus) srauto greitis.

Laminarine srove ($Re < 2300$) tekančio skysčio vidutinis greitis $w_{vid} = w_{max}/2$. Turbulentinio tekėjimo atveju greitis vamzdžio skerspjūvyje pasiskirsto tolygiau, todėl $k = 0{,}8$–$0{,}9$.

Greičių santykio priklausomybė nuo Reinoldso kriterijaus pateikta 1.2 pav.



1.2 pav. Skysčio srauto tekėjimo vidutinio ir maksimalaus greičių santykio priklausomybė nuo Reinoldso kriterijaus

11. Skysčio ištekėjimo per indo dugne arba sienelėje įrengtą mažą plonasienę skerspjūvio ploto f_0 angą, kai skysčio lygis inde yra pastovus, tūrio debitas V_s skaičiuojamas pagal lygtį:

$$V_s = \alpha \cdot f_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}; \qquad (1.21)$$

čia α – debito koeficientas; H – skysčio viršutinio sluoksnio aukštis virš angos centro, m, f_0 – angos skerspjūvio plotas, m^2.

Jei slėgiai viršutiniame skysčio lygyje p_0 ir ties anga p yra skirtingi, tai (1.21) lygtis užrašoma:

$$V_s = \alpha \cdot f_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (H + \frac{p_0 - p}{\rho \cdot g})};$$

čia ρ – skysčio tankis, kg/m^3.

12. Trukmė τ, per kurią iš rezervuaro, kurio skerspjūvio plotas f, per skerspjūvio ploto f_0 angą išteka skystis nuo pradinio aukščio H iki angos lygio, gali būti apskaičiuojama pagal lygtį:

$$\tau = \frac{2 \cdot f \cdot \sqrt{H}}{\alpha \cdot f_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g}}; \qquad (1.22)$$

čia H – skysčio sluoksnio aukštis virš angos centro, m, α – debito koeficientas.

13. Vamzdžiais tekančių skysčių ir dujų debitas gali būti apskaičiuotas, išmatavus slėgio aukščių skirtumą abipus specialių matavimo elementų, pvz., Venturio vamzdžio, diafragmos, tūtos.

Matuojant slėgio aukščių skirtumą abipus diafragmos, tūtos ar ventūrio vamzdžio, tūrio debitas apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$V_s = \alpha \cdot k \cdot f_0 \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p}{\rho}} = \alpha \cdot k \cdot f_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H \cdot \frac{\rho_m - \rho}{\rho}}; \qquad (1.23)$$

čia α –debito koeficientas); k – pataisos koeficientas, įvertinantis vamzdžių šiurkštumą. Hidrauliškai glotniuose vamzdžiuose $k = 1$; $f_0 = 0{,}785 \cdot d_0^2$ – specialaus elemento angos skerspjūvio plotas, m^2; d_0 – angos skersmuo, m; H – skysčio lygių skirtumas manometre, prijungtame abipus elemento, m; ρ_m – manometre esančio skysčio tankis, kg/m^3; ρ – vamzdžiu tekančio srauto tankis, kg/m^3.

14. Srauto greičiui apskaičiuoti galima naudoti vamzdyno centre įmontuotą Pito-Prandtlio vamzdelį. Lenkta vamzdelio dalis rodo statinio ir dinaminio slėgių aukščių sumą, o tiesaus – tik statinio slėgio aukštį. Todėl prie jų prijungtas manometras rodo skysčio dinaminio slėgio aukštį H, pagal kurį galima apskaičiuoti ašinį maksimalų greitį.

Tėkmės greitis apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$w_{max} = \sqrt{2 \cdot g \cdot H \cdot (\rho_m - \rho) / \rho_m}. \qquad (1.24)$$

Pagal šią w_{max} vertę, apskaičiuojama Re vertė ir iš grafiko (1.2 pav.), nustatę santykį w_{vid}/w_{max}, apskaičiuojame vidutinį greitį $w_{vid} = k \cdot w_{max}$.

Šiuo atveju skysčio arba dujų debitas apskaičiuojamas pagal (1.14) lygtį.

15. Siurblio (ventiliatoriaus) atiduodama skysčiui galia N, kW, apskaičiuojama pagal lygtį:

$$N = \frac{V_s \cdot \Delta p}{1000 \cdot \eta} = \frac{V_s \cdot \rho \cdot g \cdot H}{1000 \cdot \eta}; \qquad (1.25)$$

čia V_s – siurblio (ventiliatoriaus) našumas, m^3/s; Δp – siurbliu (ventiliatoriumi) sudaromas slėgis, Pa; ρ – skysčio (dujų) tankis, kg/m^3; H – siurblio (ventiliatoriaus) sudaromas bendras slėgio aukštis, m; η – siurblio (ventiliatoriaus) naudingumo koeficientas.

Dujoms (1.25) lygtis tinka tik tuomet, kai slėgis $\Delta p \leq 0{,}981 \cdot 10^4$ Pa.

16. Bendras siurbliu sudaromas slėgis Δp, Pa, yra reikalingas nugalėti tokius pasipriešinimus (slėgio nuostolius): Δp_{gr} – greičio slėgio nuostolius, t. y. slėgis, reikalingas išvystyti užsiduotą skysčio srauto greitį ($\Delta p_{gr} = w^2 \cdot \rho 2$), Δp_{tr} – slėgio nuostolius dėl trinties į vamzdžio sieneles ir tarp gretimų sluoksnių, $\Delta p_{v.k}$ – slėgio nuostolius dėl vietinių kliūčių vamzdyne, Δp_{pak} – slėgio nuostolius dėl skysčio pakėlimo į tam tikrą aukštį H_g ($\Delta p_{pak} = \rho \cdot g \cdot H_g$), Δp_p – slėgių skirtumą tarp slėgio p_2 slėgimo linijoje ir slėgio p_1 įsiurbimo linijoje ($\Delta p_p = p_2 - p_1$).

$$\Delta p = \Delta p_{gr} + \Delta p_{tr} + \Delta p_{vk} + \Delta p_{pak} + \Delta p_{pap}. \qquad (1.26)$$

17. Slėgio nuostoliai dėl trinties vamzdžiuose ir kanaluose Δp_{tr} priklauso nuo daugelio veiksnių.

A. Izoterminis srautas.

Jei vamzdžiu tekančio srauto temperatūra yra pastovi, slėgio nuostoliai dėl trinties apskaičiuojami pagal lygtį:

$$\Delta p_{tr} = \zeta \cdot \frac{L}{d_{ekv}} \cdot \frac{w^2 \cdot \rho}{2}; \qquad (1.27)$$

čia ζ – trinties koeficientas; w – srauto greitis, m/s; d_{ekv} – vamzdžio ekvivalentinis skersmuo, m; ρ – skysčio tankis, kg/m^3; L – vamzdžio ilgis, m.

Trinties koeficiento ζ vertė parenkama 1.3 pav. arba apskaičiuojama pagal toliau pateiktas lygtis.

1) Laminarinio tekėjimo atveju (Re ≤ 2300*)* ζ vertė nepriklauso nuo vamzdžio sienelės šiurkštumo, bet priklauso nuo *Re*. Apvaliems vamzdžiams:

$$\zeta = 64/Re. \qquad (1.28)$$

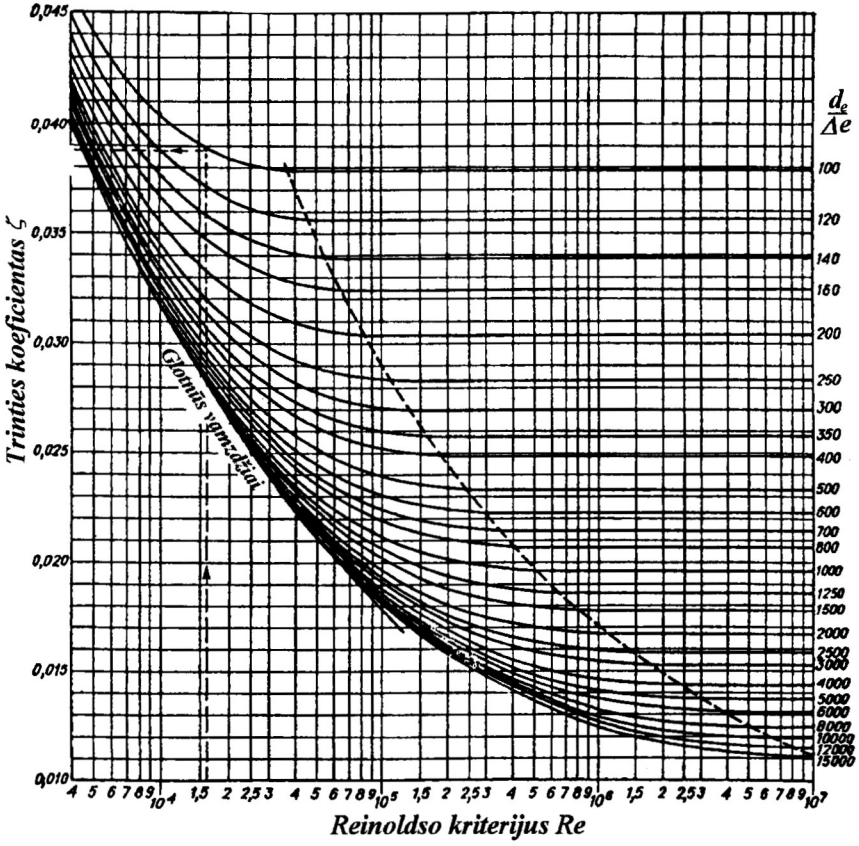
Šiuo atveju (1.27) lygtis įgauna tokią išraišką:

$$\Delta p_{tr} = 32 \cdot \frac{w \cdot \mu \cdot L}{d_{ekv}^2}. \qquad (1.27a)$$

Neapvaliems vamzdžiams:

$$\zeta = A/Re\,. \qquad (1.29)$$

čia μ – medžiagos dinaminė klampa, Pa·s; koeficiento A vertės pateikiamos žinynuose.



1.3 pav. Trinties koeficiento ζ priklausomybė nuo Re ir savitajam šiurkštumui atvirkščio dydžio $d/\Delta e$

2) Turbulentinio tekėjimo atveju hidrauliškai glotniems vamzdžiams:

$$\zeta = 0{,}316 / Re^{0{,}25}\,, \text{ kai } 2300 < Re < 10^5; \qquad (1.30)$$

$$\zeta = (1{,}82\,lg\,Re - 1{,}64)^{-2}\,, \text{ kai } Re > 10^5. \qquad (1.30a)$$

Trinties koeficientas ζ šiurkščiuose vamzdžiuose apskaičiuojamas taip:

$$\frac{1}{\sqrt{\zeta}} = -2\lg\left[\frac{\varepsilon}{3{,}7} + \left(\frac{6{,}81}{Re}\right)^{0{,}9}\right]; \qquad (1.31)$$

čia ε – savitasis šiurkštumas, t. y. vamzdžio sienelėse vidutinių iškylų nelygumų aukščio Δe ir vamzdžio ekvivalentinio skersmens d_{ekv} santykis $\varepsilon = \Delta e/d_{ekv}$. Orientacinės Δe vertės pateiktos IX lentelėje.

B. Neizoterminis srautas.

Jei vamzdžiais tekančios dujos arba skysčiai šyla arba aušta, tai trinties koeficiento ζ vertės gali būti apskaičiuotos pagal lygtis, gautas (1.27) ir (1.29) lygčių dešiniąsias puses padauginus iš pataisos koeficiento χ, kuris apskaičiuojamas pagal (1.32) ir (1.32a) lygtis. Esant laminariniam tekėjimui:

$$\chi = \left(\frac{Pr_p}{Pr}\right)^{1/3}\left[1 + 0{,}22 \cdot \left(\frac{Gr \cdot Pr}{Re}\right)^{0{,}15}\right], \qquad (1.32)$$

o turbulentinio tekėjimo atveju glotniuose vamzdžiuose:

$$\chi = \left(\frac{Pr_p}{Pr}\right)^{1/3}; \qquad (1.32a)$$

čia *Pr, Re, Gr* – Prandtlio, Reinoldso ir Grashofo kriterijai, apskaičiuoti vidutinei skysčių arba dujų temperatūrai; Pr_p – skysčio Prandtlio kriterijus, apskaičiuotas esant vamzdžio sienelės paviršiaus temperatūrai.

Dujoms santykis (Pr_p/Pr) yra pastovus ($\approx$1). Lašeliniams skysčiams Prandtlio kriterijaus vertė mažėja, didėjant temperatūrai, todėl pataisos koeficientas, skaičiuotas pagal (1.32a) lygtį, šaldant skysčius ($t_p < t$) yra didesnis už 1, o juos šildant ($t_p > t$) – mažesnis už 1.

18. Slėgio nuostoliai dėl trinties gyvatukuose $\Delta p_{tr,gyv}$ yra didesni negu tiesiuose vamzdžiuose Δp_{tr} ir apskaičiuojami:

$$\Delta p_{tr,gyv} = \Delta p_{tr} \cdot (1 + 3{,}54 \cdot d/D); \qquad (1.33)$$

čia d – vidinis vamzdžio skersmuo, m; D – gyvatuko skersmuo, m.

19. Slėgio nuostolius dėl vietinių kliūčių $\Delta p_{v.k}$, kai tekėjimo greitis pakinta dėl pasikeitusio skerspjūvio arba tekėjimo krypties (staigaus susiaurėjimo, praplatėjimo, posūkių, ventilių, čiaupų ir kt.), galime apskaičiuoti pagal tokią lygtį:

$$\Delta p_{v.k} = \sum \xi \cdot \frac{w^2 \cdot \rho}{2}; \qquad (1.34)$$

čia ξ – vietinių kliūčių koeficientas. Daugelio kliūčių pasipriešinimų koeficientų vertės yra pateiktos priedų VII lentelėje.

Kartais slėgio nuostoliai dėl vietinių kliūčių yra prilyginami ekvivalentinio ilgio tiesaus vamzdžio trinties pasipriešinimui. Vamzdis turi tokį patį pasipriešinimą dėl trinties kaip ir atitinkama vietinė kliūtis.

$$\Delta p_{v.k} = \zeta \cdot \frac{L_{ek}}{d} \cdot \frac{w^2 \cdot \rho}{2}. \qquad (1.34a)$$

Bendras siurbliu sudaromas slėgis Δp apskaičiuojamas į (1.26) lygtį įrašę konkrečias visų slėgio nuostolių išraiškas:

$$\Delta p = \frac{w^2 \cdot \rho}{2}\left(1 + \frac{\zeta \cdot L}{d_{ekv}} + \sum \xi\right) + \rho \cdot g \cdot H_g + (p_2 - p_1), \qquad (1.26a)$$

$$\Delta p = \frac{w^2 \cdot \rho}{2}\left(1 + \frac{\zeta(L + \sum L_{ek})}{d_{ekv}}\right) + \rho \cdot g \cdot H_g + (p_2 - p_1). \qquad (1.26b)$$

20. Siurblio sudaromas slėgio aukštis H, m, apskaičiuojamas pagal energijos tvermės dėsnį (Bernulio lygtį):

$$H = \frac{p_2 - p_1}{\rho \cdot g} + H_g + h_n = \frac{p_{sl} - p_{is}}{\rho \cdot g} + H_0 + \frac{w_{sl}^2 - w_{is}^2}{2 \cdot g}; \qquad (1.35)$$

čia H – siurblio sudaromas slėgio aukštis, m; p_2 ir p_{sl} – statinis slėgis slėgimo linijose, Pa; p_1 ir p_{is} – statinis slėgis įsiurbimo linijose, Pa; ρ – transportuojamo skysčio tankis, kg/m^3; H_g – skysčio pakėlimo geometrinis aukštis, m; h_n – slėgio aukštis, reikalingas suteikti srautui greitį ir nugalėti trinties jėgų ir vietinių kliūčių pasipriešinimą slėgimo ir įsiurbimo linijose, m; H_0 – vertikalus atstumas tarp p_{sl} ir p_{is} matavimo taškų, m; w_{sl} ir w_{is}– skysčio judėjimo greitis slėgimo ir įsiurbimo linijose, m/s.

Kai greičiai w_{sl} ir w_{is} vienodi, o $H_0 << H_g$, tada:

$$H = (p_{sl} - p_{is})/(\rho \cdot g). \qquad (1.36)$$

21. Stūmoklinio siurblio našumas V_s, m^3/s, apskaičiuojamas priklausomai nuo siurblio konstrukcijos.

a) viengubo veikimo paprasto stūmoklinio (plunžerinio) siurblio našumas apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$V_s = F \cdot s \cdot n \cdot \eta_t; \qquad (1.37)$$

b) dvigubo veikimo paprasto stūmoklinio siurblio našumas:

$$V_s = (2 \cdot F - f) \cdot s \cdot n \cdot \eta_t; \qquad (1.38)$$

čia F – stūmoklio plotas, m^2; f – stūmoklio koto skerspjūvio plotas, m^2; s – stūmoklio eiga, m; n – alkūninio veleno sukimosi dažnis, s^{-1}; η_t – tūrio naudingumo koeficientas.

22. Teorinis stūmoklinio siurblio įsiurbimo aukštis $H_{įs}$, m, negali viršyti atmosferinio slėgio A, išreikšto transportuojamo skysčio stulpo aukščiu:

$$H_{įs} = A - h_t - \sum h_{įs} \; ; \tag{1.39}$$

čia h_t – slėgio, atitinkančio transportuojamo skysčio temperatūros sočiųjų garų slėgį, aukštis, m. h_t vertė keičiasi, didėjant skysčio temperatūrai. Ji apskaičiuojama pagal 1.4 lygtį naudojantis XIV lentelės duomenimis; $\sum h_{įs}$ – siurbimo aukščio nuostoliai, m; A vertė priklauso nuo siurblio pastatymo aukščio virš jūros lygio; jei siurbiamas vanduo jūros lygyje, tai A = 10,3 m, todėl $H_{įs} < 10{,}3$ m.

23. Išcentrinio siurblio našumo V_s, m^3/s, sudaromo slėgio p, Pa, arba slėgio aukščio H, m, ir galios N, kW, priklausomybę nuo sukimosi dažnio n nusakoma proporcingumo dėsniai:

$$\frac{V_{s1}}{V_{s2}} = \frac{n_1}{n_2}, \quad \frac{H_1}{H_2} = (\frac{n_1}{n_2})^2, \quad \frac{N_1}{N_2} = (\frac{n_1}{n_2})^3. \tag{1.40}$$

24. Ventiliatoriumi sudaromas slėgių skirtumas Δp apskaičiuojamas pagal Bernulio energijos balanso lygtį:

$$\Delta p = (p_2 - p_1) + (\Delta p_{sl} + \Delta p_{įs}) + \frac{\rho \cdot w^2}{2} =$$
$$= (p_{sl} + \frac{\rho \cdot w_{sl}^2}{2}) - (p_{įs} + \frac{\rho \cdot w_{įs}^2}{2}); \tag{1.41}$$

čia p_1 – slėgis ertmėje, iš kurios ventiliatorius siurbia dujas, Pa; p_2 – slėgis ertmėje, į kurią ventiliatorius transportuoja dujas, Pa; Δp_{sl} ir $\Delta p_{įs}$ – slėgio nuostoliai slėgimo ir įsiurbimo linijose, Pa; $\frac{\rho \cdot w^2}{2}$ – slėgis, reikalingas dujų srauto greičiui w pasiekti, Pa; w_{sl} ir $w_{įs}$ – dujų greičiai slėgimo ir siurbimo linijose, m/s.

Jeigu ventiliatoriumi transportuojamų dujų tankis labai skiriasi nuo aplinkos oro, tai (1.41) lygties dešinė pusė papildoma gravitacinio (geometrinio) slėgio nariu, įvertinančiu Archimedo jėgų poveikį suminiam slėgių skirtumui Δp:

$$\Delta p_{pak} = (\rho - \rho_o) \cdot g \cdot z$$

čia ρ – transportuojamų dujų tankis, kg/m^3; ρ_o – oro tankis, kg/m^3; z – aukščių skirtumas tarp dujų įsiurbimo ir išmetimo taškų, m.

Variklio perduodama ventiliatoriui galia apskaičiuojamas pagal (1.25) lygtį.

25. Viengubo veikimo stūmoklinio kompresoriaus našumas V_s, m^3/s, apskaičiuojamas taip:

$$V_s = \lambda_k \cdot F \cdot s \cdot n; \qquad (1.42)$$

čia λ_k – kompresoriaus išnaudojimo koeficientas; F – stūmoklio skerspjūvio plotas, m^2; s – stūmoklio eiga, m; n – sukimosi dažnis, s^{-1}.

Kompresoriaus išnaudojimo koeficientas apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$\lambda_k = \left(0{,}80 \div 1{,}0\left\{1 - \varepsilon_0\left[\left(p_2 / p_1\right)^{1/m} - 1\right]\right\}\right); \qquad (1.43)$$

čia ε_0 – kenksmingo tūrio ir cilindro tūrio, esant ribiniai stūmoklio padėčiai, santykis; m – dujų politropės rodiklis.

1.2. Uždavinių sprendimo pavyzdžiai

1.1. Pvz. Vienos ėjos korpusinio šilumokaičio lygiagrečiuose vamzdžiuose 9,0 m/s greičiu transportuojamas 50 °C temperatūros ir 2 at manometrinio slėgio oras. Vamzdžių skaičius – 121, jų skersmuo (38×2) mm. Barometrinis slėgis B = 740 mm Hg. Apskaičiuoti: a) oro masės debitą; b) oro tūrio debitą darbinėmis sąlygomis; c) oro tūrio debitą, perskaičiuotą normaliomis sąlygomis, (T_0 = 273 K, p_0 = 760 mm Hg).

S p r e n d i m a s. Darbinis absoliutusis slėgis:

$$p_{abs} = B + p_m = 740 \cdot 133{,}3 + 2 \cdot 9{,}81 \cdot 10000 = 294800 \text{ Pa},$$

Oro tankis darbinėmis sąlygomis:

$$\rho = \frac{29}{22{,}4} \cdot \frac{293930}{101300} \cdot \frac{273}{273+50} = 3{,}18 \text{ kg/m}^3.$$

Oro masės debitą apskaičiuojame pagal (1.14) lygtį:

$$G_s = w \cdot f \cdot \rho \cdot n = 0{,}785 \cdot d^2 \cdot w \cdot \rho \cdot n =$$

$$= 9 \cdot 121 \cdot 0{,}785 \cdot (38 - 2 \cdot 2)^2 \cdot 10^{-6} \cdot 3{,}18 = 3{,}14 \text{ kg/s}.$$

Oro tūrio debitas darbinėmis sąlygomis:

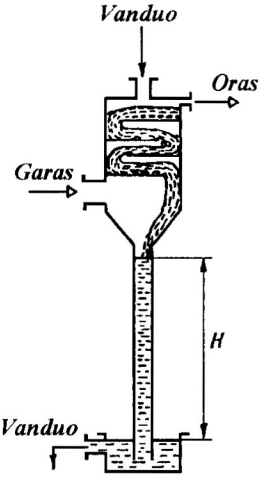
$$V_s = G_s / \rho = 3{,}14 / 3{,}18 = 0{,}988 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Oro tūrio debitas, perskaičiuotas normaliomis sąlygomis:

$$V_s = G_s / \rho_0 = 3{,}14 / 1{,}29 = 2{,}43 \text{ m}^3/\text{s}.$$

čia ρ_0 = 29/22,4 = 1,29 kg/m^3 – oro tankis normaliomis sąlygomis

1.2. Pvz. Vakuummetras, prijungtas prie barometrinio kondensatoriaus, rodo 280 mm Hg slėgį. Barometrinis slėgis 752 mm Hg. Apskaičiuoti absoliutųjį slėgį kondensatoriuje ir vandens lygį barometriniame vamzdelyje (1.4 pav.).



1.4 pav. Barometrinio kondensatoriaus schema

S p r e n d i m a s. Absoliutusis slėgis kondensatoriuje:

$$p = B - p_v = 752 - 280 = 472\ mm\ Hg$$
$$= 472 \cdot 133{,}3 = 62918\ Pa =$$
$$= 36260 / \left(9{,}81 \cdot 10^4\right) = 0{,}641 at$$

Vandens stulpelio aukštis apskaičiuojamas pagal (1.15) lygtį:

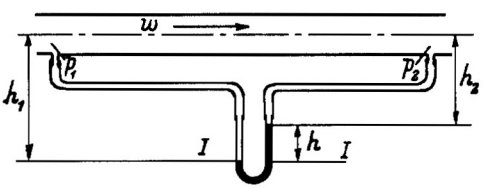
$$H = (B - p)/(\rho \cdot g) =$$
$$= (752 - 472) \cdot 133{,}3 / (1000 \cdot 9{,}81) =$$
$$= 3{,}80\ m$$

čia $\rho = 1000$ kg/m^3 – vandens tankis.

1.3. Pvz. Gyvsidabrinis difmanometras, prijungtas horizontalaus vamzdžio dviejuose taškuose (1.5 pav.), rodo 16 mm aukščio skirtumą. Apskaičiuoti statinių slėgių skirtumą manometro prijungimo taškuose, jei vamzdžiu teka:

a) vanduo;

b) atmosferinio slėgio ir 20 °C temperatūros oras.



1.5 pav. Statinių slėgių skirtumo matavimo vamzdyne schema (1.3. Pvz.)

S p r e n d i m a s. Užrašome jėgų, veikiančių manometro skystį *I–I* lygyje, pusiausvyros lygtį:

$$p_1 + \rho \cdot g \cdot h_1 = p_2 + \rho \cdot g \cdot h_2 + \rho_M \cdot g \cdot h\ .$$

Iš jos apskaičiuojamas slėgių skirtumas:

$$p_1 - p_2 = (\rho_M - \rho) \cdot g \cdot h\ ;$$

čia ρ_M ir ρ – manometre esančio skysčio ir tekančio skysčio tankis, kg/m^3; $h = h_1 - h_2$.

a) $p_1 - p_2 = (13600\text{-}1000) \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}016 = 1978$ Pa;

b) 20 °C temperatūros oro tankis $\rho = 1{,}29 \cdot 273/(273+20) = 1{,}20$ kg/m^3,

$p_1 - p_2 = (13600\text{-}1{,}20) \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}16 = 2134$ Pa.

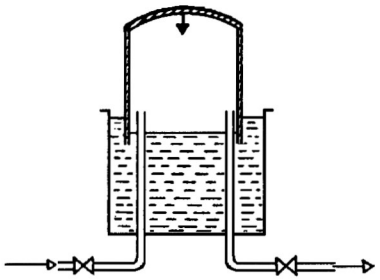
1.4. Pvz. Dujų saugyklos gaubto masė yra 2900 kg (1.6 pav.). Jos pagrindo skersmuo 6,0 m. Apskaičiuoti dujų slėgį saugyklos viduje.

S p r e n d i m a s. Plotas, kurį slegia saugyklos gaubto masė:

$$f = (\pi/4) \cdot 6{,}0^2 = 28{,}3 \text{ m}^2.$$

Slėgis dujų saugykloje atitinka saugyklos gaubto sunkio jėgą, tenkančią jo pagrindo ploto vienetui:

$$p_{pert} = 2900 \cdot 9{,}81/28{,}3 = 1005 \text{ N/m}^2.$$



1.6 pav. Dujų saugyklos schema (1.4. Pvz.)

1.5. Pvz. Apskaičiuoti suskystinto oro kinematinę klampą, esant -189 °C temperatūrai ir atmosferiniam slėgiui, jei skystyje yra 81 % N_2 ir 19 % O_2. Dinaminė klampa, esant -189 °C temperatūrai, atitinkamai $\mu_{O_2} = 22{,}6 \cdot 10^{-5}$ Pa·s, $\mu_{N_2} = 11{,}8 \cdot 10^{-5}$ Pa·s.

S p r e n d i m a s. Pagal (1.9) lygtį apskaičiuojame skysčio mišinio dinaminę klampą:

$$lg\mu_m = 0{,}81 \cdot lg\left(11{,}89 \cdot 10^{-5}\right) + 0{,}19 \cdot lg\left(22{,}6 \cdot 10^{-5}\right) = -3{,}875;$$

$\mu_{sm} = 13{,}3 \cdot 10^{-5}$ Pa·s.

Kad galėtume pagal (1.5) lygtį apskaičiuoti kinematinę klampą, molines komponentų dalis reikia perskaičiuoti masės dalimis:

$$x_{N_2} = \frac{0{,}81 \cdot 28}{0{,}81 \cdot 28 + 0{,}19 \cdot 32} = 0{,}789,$$

$$x_{O_2} = \frac{0{,}19 \cdot 32}{0{,}19 \cdot 32 + 0{,}81 \cdot 28} = 0{,}211.$$

Pagal (1.3) lygtį apskaičiuojamas dujų mišinio tankis:

$$\rho_m = (0{,}789/780 + 0{,}211/1180)^{-1} = 841 \text{ kg/m}^3;$$

čia $\rho_{N_2} = 780$ kg/m^3, $\rho_{O_2} = 1180$ kg/m^3 – skysto azoto ir skysto deguonies tankis.

Kinematinė mišinio klampa apskaičiuojama taip:

$$\nu_m = \mu_m / \rho_m = 13{,}3 \cdot 10^{-5} / 841 = 0{,}158 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}.$$

1.6. Pvz. Apskaičiuoti suspensijos dinaminę klampą. Suspensija pagaminta iš 10 m^3 vandens ir 800 kg dispersinės kietos fazės. Kietos fazės tankis 1200 kg/m^3. Suspensijos temperatūra 20 °C.

S p r e n d i m a s. Suspensijos kietos fazės tūris:

$$V_K = M_K / \rho = 800/1200 = 0{,}667 \ \text{m}^3.$$

Kietos fazės tūrinė koncentracija suspensijoje:

$$\varphi_K = V_k / (V_{sk} + V_k) = 0{,}667/(10 + 0{,}667) = 0{,}0625 \ \text{m}^3/\text{m}^3.$$

20 °C temperatūros vandens dinaminė klampa $\mu_{sk} = 1 \cdot 10^{-3}$ Pa·s (I pav.).

Suspensijos dinaminė klampa apskaičiuojama pagal (1.11) lygtį:

$$\mu_{susp} = 1{,}0 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 2{,}5 \cdot 0{,}0625) = 1{,}16 \cdot 10^{-3} \ \text{Pa·s}.$$

1.7. Pvz. Tam tikrų skysčių dinaminės klampos žinomos, esant dviems skirtingoms temperatūroms: 20 °C $\mu_1 = 0{,}90 \cdot 10^{-3}$ Pa·s, o 50 °C $\mu_2 = 0{,}60 \cdot 10^{-3}$ Pa·s. Apskaičiuoti 70 °C temperatūros skysčio klampą.

S p r e n d i m a s. Etaloniniu skysčiu pasirenkamas vanduo, kurio klampos priklausomybė nuo temperatūros yra žinoma. Pagal I pav. parenkama: $\mu_1 = 0{,}90 \cdot 10^{-3}$ Pa·s, kai $t_1 = 25$ °C; ir $\mu_2 = 0{,}60 \cdot 10^{-3}$ Pa·s, kai $t_2 = 45$ °C. Pagal (1.13) tiesinę priklausomybę apskaičiuojama konstantos K vertė:

$$K = (50 - 20)/(45 - 25) = 1{,}50.$$

Vandens temperatūra, kuriai esant, vandens klampa tampa lygi nagrinėjamo 70 °C temperatūros skysčio klampai, taip pat apskaičiuojama pagal tiesinę priklausomybę:

$(70 - 20)/(t - 25) = 1{,}5$, iš čia $t = 58{,}4$ °C.

Naudojantis I pav., nustatoma 58,4 °C temperatūros vandens klampa $\mu_2 = 0{,}48 \cdot 10^{-3}$ Pa·s, kuri ir yra nagrinėjamo skysčio dinaminės klampos vertė, esant 70 °C temperatūrai.

1.8. Pvz. Vamzdinio šilumokaičio (76×3) mm skersmens vamzdžiu transportuojamos atmosferinio slėgio dujos. Koks turi būti vamzdžio skersmuo, kad tos pačios dujos, suslėgtos iki 5 atmosferų perteklinio slėgio, tekėtų tuo pačiu greičiu ir masės debitu?

S p r e n d i m a s. Remiantis idealių dujų būvio (1.1) lygtimi, dujų tankis ρ_2, kai $p_{pert} = 5$ at, yra (1 + 5)/1 = 6 kartus didesnis, negu esant atmosferiniam slėgiui: $\rho_2 = 6 \cdot \rho_1$. Pagal debito lygtį (1.14):

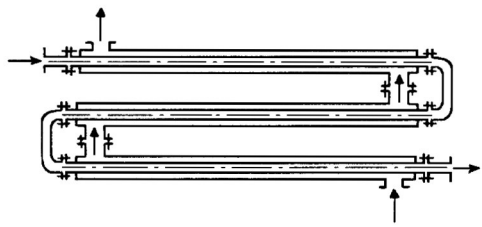
$$w_1 \cdot n_1 \cdot 0{,}785 \cdot d_1^2 \cdot \rho_1 = w_2 \cdot n_2 \cdot 0{,}785 \cdot d_2^2 \cdot \rho_2 .$$

kadangi $w_1 = w_2$, o $n_1 = n_2$:

$$d_2 = \sqrt{d_1^2 / 6} = \sqrt{\frac{0{,}070^2}{6}} = 0{,}0286\, m \approx 29 \text{ mm};$$

čia $d_1 = 0{,}076 - 2 \cdot 0{,}003 = 0{,}070$ m – vidinis pradinio vamzdžio skersmuo.

1.9. Pvz. Nustatyti vandens tekėjimo režimą tarpvamzdinėje šilumokaičio *vamzdis vamzdyje* ertmėje (1.7 pav.), jei vamzdžių skersmenys (51×2,5) mm ir (25×2) mm. Vandens masės debitas 4,1 t/h, vidutinė temperatūra 35 °C.



1.7 pav. Šilumokaičio tipo *vamzdis vamzdyje* schema (1.9. Pvz.)

S p r e n d i m a s. Vandens tėkmės greitį tarpvamzdinėje ertmėje apskaičiuojame pagal (1.14) lygtį:

$$w = G_s / (\rho \cdot f) = \left(4{,}1 \cdot 10^3 / 3600\right) / (944 \cdot 0{,}00117) = 0{,}979 \text{ m/s};$$

čia ρ = 994 kg/m^3 – 35 °C temperatūros vandens tankis; f – tarpvamzdinės ertmės skerspjūvio plotas, $f = 0{,}785 \cdot (0{,}046^2 - 0{,}025^2) = 0{,}00117$ m^2.

Tarpvamzdinės ertmės ekvivalentinis skersmuo apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$d_{ekv} = 4 \cdot f / P = 4 \cdot 0{,}00117 / \pi \cdot (0{,}046 + 0{,}025) = 0{,}021 \text{ m}.$$

čia D ir d – išorinio vamzdžio vidinis ir vidinio vamzdžio išorinis skersmenys.

Reinoldso kriterijaus vertė apskaičiuojama:

$$Re = 0{,}979 \cdot 0{,}021 \cdot 994 / 0{,}7225 \cdot 10^{-3} = 2830.$$

čia $\mu = 0{,}7225 \cdot 10^{-3}$ Pa·s – 35 °C temperatūros vandens dinaminė klampa.

Kadangi Re = 28300 > Re_{kr} = 10000, tai vandens tekėjimo režimas tarpvamzdine erdve yra turbulentinis.

1.10. Pvz. Apskaičiuoti kritinį tėkmės greitį w tiesiame (51×2,5) mm skersmens vamzdyje: a) tekant orui, kai p_{abs} = 1 at ir t = 20 °C; b) tekant $35{,}0 \cdot 10^{-3}$ Pa·s dinaminės klampos ir 960 kg/m^3 tankio tepalui.

S p r e n d i m a s. Kritinė Reinoldso kriterijaus vertė tiesiame vamzdyje yra 2300. Todėl naudojantis (1.17) lygtimi, ieškomo greičio vertė apskaičiuojama taip:

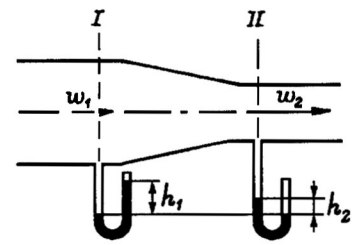
$$w = 2300 \cdot \mu/(\rho \cdot d).$$

a) $w = 2300 \cdot 0{,}0184 \cdot 10^{-3}/(1{,}20 \cdot (0{,}051 - 2 \cdot 0{,}0025)) = 0{,}767$ m/s

čia μ = $0{,}0184 \cdot 10^{-3}$ Pa·s – oro dinaminė klampa (II pav.); $\rho = 1{,}293 \cdot 273/(273 + 20) = 1{,}20$ kg/m^3 – oro tankis.

b) $w = 2300 \cdot 35{,}0 \cdot 10^{-3}/(960 \cdot (0{,}051 - 2 \cdot 0{,}0025)) = 1{,}82$ m/s.

1.11. Pvz. Horizontaliu vamzdynu, kuriame vamzdžio skersmuo nuo 200 mm tolygiai susiaurėja iki 100 mm, transportuojamas 30 °C temperatūros metanas 1700 m^3/h debitu (skaičiuotu normaliomis sąlygomis). Atmosferinis slėgis 760 mm Hg. Vandeniu užpildytas manometras rodo aukščių skirtumą $h_1 = 40$ mm (1.8 pav.). Apskaičiuoti metano statinį slėgį siauresniame *II* skerspjūvyje ir toje pačioje dalyje prijungto manometro rodmenis, jei susiaurėjime neatsižvelgiama į energijos nuostolius.



1.8 pav. Srauto judėjimo siaurėjančiame vamzdyje schema (1.11. Pvz.)

S p r e n d i m a s. Statinio slėgio skirtumas *I* ir *II* skerspjūviuose apskaičiuojamas naudojant Bernuli lygtį (1.20) idealiam srautui (metano tankis nekinta $\rho_1 = \rho_2 = \rho = const$):

$$p_1 - p_2 = \left(w_2^2 - w_1^2\right) \cdot \rho/2.$$

Kadangi vamzdynas horizontalus, tai $z_1 = z_2$.

Pagal (1.14) lygtį apskaičiuojamas metano greitis *I* ir *II* skerspjūviuose darbinėmis sąlygomis:

$$w_1 = \frac{1700}{3600} \cdot \frac{273 + 30}{273} / (\frac{\pi}{4} \cdot 0{,}200^2) = 16{,}7 \text{ m/s},$$

$$w_2 = 16{,}7 \cdot (0{,}200/0{,}100)^2 = 66{,}8 \text{ m/s}.$$

Pagal (1.1) lygtį apskaičiuojamas metano tankis *II* skerspjūvyje:

$$\rho_1 = \frac{M \cdot T_0}{22{,}4 \cdot T} = \frac{16}{22.4} \cdot \frac{273}{273 + 30} = 0{,}645 \text{ kg/m}^3.$$

Apskaičiuojame statinių slėgių skirtumą:

$$p_1 - p_2 = \left(66{,}8^2 - 16{,}7^2\right) \cdot 0{,}645/2 = 1354\, Pa = 1354/9{,}81\, mmH_2O = 138\, mmH_2O.$$

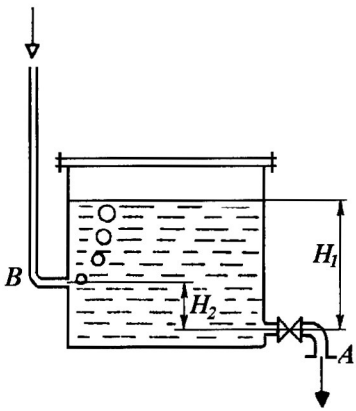
Metano statinis slėgis *II* skerspjūvyje:

$$p_2 = p_1 - 138 = 40 - 138 = -98\ mmH_2O\ .$$

II skerspjūvyje statinis slėgis bus 138 mm H_2O mažesnis už statinį slėgį *I* skerspjūvyje, t. y. *II* skerspjūvyje manometras rodys 98 mm H_2O arba 961 Pa vakuumą. Absoliutusis slėgis *II* skerspjūvyje apskaičiuojamas:

$$h_2 = 760 - 758{,}4 = 1{,}6\ mmHg = 1{,}6 \cdot 133{,}6\ Pa = 218\ Pa\ .$$

1.12. Pvz. Iš Marioto indo (1.9 pav.), kuriame nuo aukščio H_1 = 2400 mm iki H_2 = 1000 mm vanduo išteka pastoviu greičiu per apatinį vamzdį *A*. Apskaičiuoti vandens ištekėjimo greitį ir jo lygio sumažėjimo nuo H_1 iki H_2 trukmę, jei cilindrinės talpos skersmuo *D* = 1600 mm, ištekėjimo vamzdžio *A* skersmuo d_0 = 25 mm, debito koeficientas α = 0,64.



1.9 pav. Marioto indo schema (1.12. Pvz.)

S p r e n d i m a s. Per angą ištekančio vandens greitis apskaičiuojamas pagal (1.21) lygtį:

$$w = \alpha\sqrt{2 \cdot g \cdot H} = 0{,}64\sqrt{2 \cdot 9{,}81 \cdot 1{,}0} = 2{,}83\ \text{m/s}.$$

Iš talpos ištekėjęs vandens tūris, jo lygiui talpoje mažėjant nuo 2400 mm iki 1000 mm, apskaičiuojamas taip:

$$V = 0{,}785 \cdot 1{,}6^2 \cdot (2{,}4 - 1{,}0) = 2{,}81\ \text{m}^3$$

Kadangi *w* pastovus, šis vandens tūris ištekės per:

$$\tau = V/(f_0 \cdot w) = 2{,}81/(0{,}785 \cdot 0{,}025^2 \cdot 2{,}83) = \ 2020\ \text{s}$$

1.13. Pvz. Apskaičiuoti per kiek laiko ištekės vanduo iš atviro cilindrinio indo (*d* = 1,6 m). Inde pradinis vandens lygis 1,0 m, angos skersmuo 0,025 m, debito koeficientas α_0 = 0,64.

S p r e n d i m a s. Vandens tekėjimo trukmė, jam tekant iš indo, kuriame pastoviai mažėja vandens stulpo aukštis virš angos centro, apskaičiuojama pagal (1.22) lygtį:

$$\tau = 2 \cdot 0{,}785 \cdot 1{,}6^2 \sqrt{\frac{1{,}0}{2 \cdot 9{,}81}} / (0{,}64 \cdot 0{,}785 \cdot 0{,}025^2) = 2890\ \text{s}$$

1.14. Pvz. Horizontaliame vamzdyje, kurio vidinis skersmuo 152 mm, įrengta 83,5 mm skersmens diafragma. Apskaičiuoti tūrio ir masės debitą, vandens greitį vamzdyje ir diafragmos angoje, jei abipus diafragmos prijungtas gyvsidabrio manometras rodo 180 mm aukščių skirtumą. Vandens temperatūra 20 °C.

S p r e n d i m a s. Tūrio debitas V_s skaičiuojamas pagal (1.23) lygtį nuoseklaus priartėjimo metodu. Pagal $m = (83{,}5/152)^2 = 0{,}302$ ir turbulentinį tekėjimo režimą parenkamas diafragmos debito koeficientas $\alpha = 0{,}65$. Tada pirmasis apytikris debitas:

$$V_s = 0{,}65 \cdot 0{,}785 \cdot 0{,}0835^2 \sqrt{2 \cdot 9{,}81 \frac{13600 - 1000}{1000} 0{,}180} = 0{,}0302 \text{ m}^3/\text{s};$$

čia ρ_m = 13600 kg/m^3 ir ρ = 1000 kg/m^3 – gyvsidabrio ir vandens tankis, esant 20 °C temperatūrai.

Esant tokiai debito vertei, vandens greitis vamzdyne:

$$w_1 = 0{,}0302/\left(0{,}785 \cdot 0{,}152^2\right) = 1{,}67 \text{ m/s}.$$

Reinoldso kriterijaus vertė:

$$Re = 1{,}67 \cdot 0{,}152/\left(1{,}01 \cdot 10^{-6}\right) = 254000;$$

čia $\nu = 1{,}01 \cdot 10^{-6}$ m^2/s – 20 °C temperatūros vandens kinematinė klampa.

Turėdami tokią Re vertę ir $m = 0{,}302$, lentelėse parenkame patikslintą debito koeficiento vertę $\alpha = 0{,}635$ ir apskaičiuojame tikslesnį vandens debitą:

$$V_s = 0{,}0302 \cdot (0{,}635/0{,}65) = 0{,}0295 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Atitinkamai:

$$w_1 = 1{,}67 \cdot (0{,}635/0{,}65) = 1{,}63 \text{ m/s}.$$

Kadangi pirminis rezultatas nedaug skiriasi nuo patikslinto, todėl perskaičiuoti netikslinga. Apskaičiuojame vandens masės debitą ir jo greitį diafragmos angoje:

$$G_s = V_s \cdot \rho = 0{,}0295 \cdot 1000 = 29{,}5 \text{ kg/s},$$

$$w_0 = 1{,}63 \cdot (0{,}152/0{,}0835)^2 = 5{,}40 \text{ m/s}.$$

1.15. Pvz. Oratiekio vamzdyno (d = 159×3,5 mm) ašyje įtaisytas Pito-Prandtlio vamzdelis. Apskaičiuoti oro maksimalų ir vidutinį greitį, jo masės ir tūrio debitą normaliomis ir darbinėmis sąlygomis, jei slėgis vamzdyne atmosferinis, temperatūra 40 °C, prie vamzdelio prijungtas manometras rodo 15 mm H_2O.

S p r e n d i m a s. Maksimalus oro greitis vamzdyno ašyje skaičiuojamas pagal (1.24) lygtį:

$$w_m = \sqrt{2 \cdot 9{,}81 \frac{1000 - 1{,}13}{1{,}13} 0{,}015} = 16{,}13 \text{ m/s};$$

čia $\rho = (29/22{,}4) \cdot 273/(273+40) = 1{,}13$ kg/m^3 – 40 °C temperatūros oro tankis.

Reinoldso kriterijaus vertė, kai greitis maksimalus:

$$Re_m = 16{,}13 \cdot 0{,}152 \cdot 1{,}13 / 0{,}019 \cdot 10^{-3} = 145807;$$

čia $\mu = 0{,}019 \cdot 10^{-3}$ Pa·s – 40 °C temperatūros oro dinaminė klampa (II pav.).

Pagal $Re_m = 145807$ iš 1.1 pav. parenkamas greičių santykis $w/w_m = 0{,}83$. Vidutinė greičio vertė:

$w = 16{,}13 \cdot 0{,}83 = 13{,}39$ m/s.

Tūrio debitas darbinėmis sąlygomis:

$$V_s = 13{,}39 \cdot 0{,}785 \cdot 0{,}152^2 = 0{,}243 \text{ m}^3/\text{s}$$

ir normaliomis sąlygomis:

$$V_s = 0{,}243\, 273/(273+40) = 0{,}212 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Oro masės debitas:

$$G_s = 0{,}243 \cdot 1{,}13 = 0{,}212 \cdot 1{,}293 = 0{,}274 \text{ kg/s}.$$

1.16. Pvz. 250 °C temperatūros degimo dujos transportuojamos horizontaliu dujotiekiu, kurio ilgis L_d ir skersmuo d_d, po to per 20 m aukščio kaminą, kurio skersmuo d_k, dujos pašalinamos į atmosferą. Oro temperatūra 17 °C. Dujų sudėtis tūrio procentais: N_2 – 77,5; CO_2 – 12,7; O_2 – 4,9; H_2O – 4,9. Dujotiekio ir kamino skerspjūvio plotai vienodi. Apskaičiuoti oro greitį, jei suminiai trinties ir vietinių kliūčių koeficientai išreiškiami lygybe:

$$\zeta \cdot L / d_d + \zeta \cdot H / d_k + \sum \xi_i = 27{,}0;$$

čia ζ – trinties koeficientas, vienodas dujotiekyje ir kamine; $\sum \xi_i$ – vietinių kliūčių koeficientų suma.

S p r e n d i m a s. Degimo dujų tankis normaliomis ir darbinėmis sąlygomis:

$$\rho_0 = (28{,}0 \cdot 0{,}775 + 44 \cdot 0{,}127 + 32 \cdot 0{,}049 + 18 \cdot 0{,}049) / 22{,}4 = 1{,}33 \text{ kg/m}^3,$$

$$\rho_d = 1{,}33 \cdot 273/(273+250) = 0{,}693 \text{ kg/m}^3.$$

Atmosferinio slėgio oro tankis:

$$\rho_{oro} = 1{,}29 \cdot 273/(273+17{,}5) = 1{,}22 \text{ kg/m}^3.$$

Užrašoma Bernulio (1.20a) lygtis, dujų srautui įtekant į dujotiekį ir ištekant iš kamino:

$$p_{bar1} + \rho_d \cdot w^2/2 = p_{bar2} + \rho_d \cdot w^2/2 + \rho_d \cdot g \cdot H + \Delta p_n;$$

čia p_{bar1} ir p_{bar2} – barometrinis slėgis dujotiekyje ir dujoms ištekant iš kamino; w – dujotiekyje ir kamine vienodas dujų greitis, m/s; $\Delta p_n = 27{,}0 \cdot \rho_d \cdot w^2/2$ – suminiai slėgio nuostoliai.

Pagal (1.5) lygtį $p_{bar1} = p_{bar2} + \rho_{oro} \cdot g \cdot H$.

Pertvarkius Bernulio lygtį:

$$\Delta p_n = (\rho_{oro} - \rho_d) \cdot g \cdot H$$

$$\Delta p_n = (\zeta \cdot L / d_d + \zeta \cdot H / d + \sum \xi_j) \rho_d \cdot w_d^2 / 2 = 27{,}0 \cdot \rho_d \cdot \omega_d^2 / 2.$$

Iš pastarųjų lygčių gauname:

$$27{,}0 \cdot \rho_d \cdot w_d^2 / 2 = (\rho_{oro} - \rho_d) \cdot g \cdot H.$$

Tada:

$$w_d = \sqrt{\frac{2 \cdot (1{,}22 - 0{,}693) \cdot 9{,}81}{27{,}0 \cdot 0{,}693}} \cdot 20 = 3{,}32 \text{ m/s}.$$

1.17. Pvz. Apskaičiuoti slėgio nuostolius dėl trinties gyvatuke, kai jame teka 30 °C temperatūros vanduo 1,2 m/s greičiu. Plieninio vamzdžio skersmuo (43x2,5) mm, vijų skaičius – 10, gyvatuko skersmuo – 1,0 m.

S p r e n d i m a s. Apskaičiuojame Reinoldso kriterijaus vertę tiesiame vamzdyje:

$$Re = 1{,}2 \cdot 0{,}038 \cdot 1000 / 0{,}8 \cdot 10^{-3} = 57000;$$

čia vidinis vamzdžio skersmuo d = 0,038 m, vandens tankis ρ = 1000 kg/m^3, vandens dinaminė klampa $\mu = 0{,}8 \cdot 10^{-3}$ Pa·s – (priedų I pav.).

Nežymiai korodavusių plieninių vamzdžių šiurkštumas Δe = 0,2 mm (VII lentelė). Tada $d_{ekv}/\Delta e$ = 38/0,2 = 190. Trinties koeficientas, kai Re = 57000 ir $d_{ekv}/\Delta e$ = 190, parenkamas pagal 1.3 pav. grafiką: ζ = 0,0314.

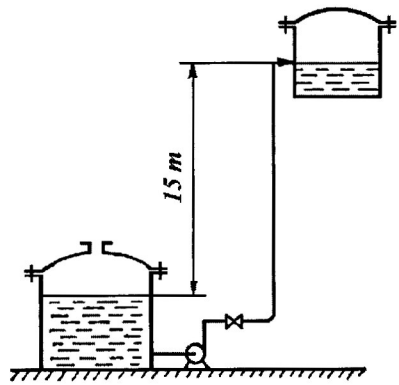
Gyvatuko vamzdžio ilgis:

$$L \cong \pi \cdot D \cdot n = 3{,}14 \cdot 1{,}0 \cdot 10 = 31{,}4 \text{ m}.$$

Slėgio nuostoliai dėl trinties gyvatuke apskaičiuojami pagal (1.33) ir (1.27) lygtis:

$$\Delta p_{tr} = (1 + 3{,}54 \cdot 0{,}038/1{,}0) \cdot 0{,}0314 \cdot (31{,}40/\ 0{,}038) \cdot 1000 \cdot 1{,}2^2/2 = 21200 \text{ Pa}.$$

1.18. Pvz. Iš talpos, kurioje palaikomas atmosferinis slėgis, į reaktorių, kuriame yra 0,1 at perteklinis slėgis, siurbliu transportuojama 20 °C temperatūros 30 t/h nitrobenzeno (1.10 pav.). Plieninio vamzdžio skersmuo (89x4) mm; bendras ilgis – 45 m; vamzdžiai nežymiai korodavę. Vamzdyne įrengta diafragma su 50 mm anga, viena sklendė ir trys 90° posūkiai, kurių apvalinimo spindulys 150 mm. Skystis pakeliamas į 15 m aukštį. Apskaičiuoti siurblio galią, jei jo naudingumo koeficientas 0,65.



1.10 pav. Skysčio transportavimo išcentriniu siurbliu schema (1.18. Pvz.)

S p r e n d i m a s. Nitrobenzeno tūrio debitas:

$$V_s = \left(30 \cdot 10^3 / 3600\right) / 1200 = 0{,}00694 \text{ m}^3/\text{s};$$

čia $\rho = 1200$ kg/m^3 – nitrobenzeno tankis (II lentelė).

Srauto greitis:

$$w = 0{,}00694 / \left(0{,}785 \cdot 0{,}081^2\right) = 1{,}35 \text{ m/s}.$$

Reinoldso kriterijus:

$Re = 1{,}35 \cdot 0{,}081 \cdot 1200 / (2{,}1 \cdot 10^{-3}) = 62500;$

čia $\mu = 2{,}1 \cdot 10^{-3}$ Pa·s – 30 °C temperatūros nitrobenzeno dinaminė klampa (I pav.).

Nežymiai koroduotų plieninių vamzdžių $\Delta e = 0{,}2$ mm (IX lentelė).

Kai $d/\Delta e = 0{,}81/0{,}0002 = 405$ ir $Re = 62500$, pagal 1.4 pav. trinties koeficientas $\zeta = 0{,}026$.

Slėgio nuostoliai dėl trinties apskaičiuojami pagal (1.27) lygtį:

$$\Delta p_{tr} = 0{,}026 \cdot \frac{45}{0{,}081} \cdot \frac{1200 \cdot 1{,}35^2}{2} = 15800 \text{ Pa}.$$

Vietinių kliūčių koeficientai parenkami VII lentelėje:

– skysčio, patenkančio iš talpos į vamzdyną – $\xi = 0{,}5$;

– diafragmos, kai $m = (50/81)^2 = 0{,}38$ – $\xi = 9{,}87$;

– sklendės – $\xi = 0{,}5$;

– 90° alkūnės, kai $R_0/d = 150/81 = 1{,}85$ – $\xi = 1{,}0 \cdot 0{,}16 = 0{,}16$.

Suminiai slėgio nuostoliai dėl vietinių kliūčių apskaičiuojami pagal (1.34) lygtį:

$$\sum \Delta p_{v.k.} = (0{,}5 + 9{,}87 + 0{,}5 + 3 \cdot 1{,}85) \cdot 1200 \cdot 1{,}35^2 / 2 = 17900 \text{ Pa}.$$

Dinaminis slėgis skysčiui tekant greičiu w:

$$\Delta p_{gr} = \rho \cdot w^2 / 2 = 1200 \cdot 1{,}35^2 / 2 = 1090 \text{ Pa}.$$

Geometrinis slėgis, pakeliant skystį į aukštį H:

$$\Delta p_{pak} = \rho \cdot g \cdot H = 1200 \cdot 9{,}81 \cdot 15 = 176600 \text{ Pa}.$$

Dėl slėgio skirtumo rinktuve ir reaktoriuje:

$$\Delta p_{pap} = 0{,}1 \cdot 9{,}81 \cdot 10^4 = 9810 \text{ Pa}.$$

Bendrieji vamzdyno slėgio nuostoliai:

$$\Delta p = 1090 + 15800 + 17900 + 176600 + 9810 = 205 \cdot 10^3 \text{ Pa}.$$

Siurblio sunaudota galia apskaičiuojama pagal (1.25) lygtį:

$$N = \frac{205 \cdot 10^3 \cdot 0{,}00694}{10^3 \cdot 0{,}65} = 2{,}19 \text{ kW}.$$

1.19. Pvz. Apskaičiuoti, koks turi būti 2000 m ilgio vamzdžio skersmuo, kad juo būtų galima transportuoti 420 kg/h 20 °C temperatūros ir atmosferos slėgio vandenilį, jeigu slėgio nuostoliai vamzdyne Δp = 120 mm H_2O.

S p r e n d i m a s. Pagal uždavinio sąlygą slėgio nuostoliai yra lygūs trinties nuostoliams, todėl (1.26) lygtį galima užrašyti:

$$\Delta p = \Delta p_{tr}.$$

Vamzdžio skersmens skaičiavimui naudojama (1.27) lygtis, kurioje dujų greitis w išreiškiamas per masės debitą:

$$\Delta p = \zeta \cdot (L/d) \cdot \rho \cdot \left[M_s / \left(\rho \cdot 0{,}785 \cdot d^2 \right) \right]^2 / 2.$$

Iš čia

$$d = \left[\frac{\zeta \cdot L \cdot M_s^{\,2}}{2 \cdot \Delta p \cdot \rho \cdot 0{,}785^2} \right]^{\frac{1}{5}} = \left[\frac{0{,}011 \cdot 2000 \cdot (420/3600)^2}{2 \cdot 120 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}0832 \cdot 0{,}785^2} \right]^{\frac{1}{5}} = 0{,}301 \text{ m};$$

čia $\rho = (2/22{,}4) \cdot 273/(273 + 20) = 0{,}0832$ kg/m^3 – 20 °C temperatūros vandenilio tankis; $\zeta = 0{,}011$ – trinties koeficiento vertė, parinkta iš 1.3 pav.

Patikslinus priimtą ζ vertę, turime apskaičiuoti vandenilio greitį:

$$w = V_s/\left(0{,}785 \cdot d^2\right) = 1{,}40/\left(0{,}785 \cdot 0{,}301^2\right) = 19{,}7 \text{ m/s};$$

čia $V_s = M_s/(3600 \cdot \rho) = 420/(3600 \cdot 0{,}0832) = 1{,}40$ m^3/s – vandenilio tūrio debitas.

Reinoldso kriterijaus vertė:

$$Re = 19{,}7 \cdot 0{,}301 \cdot 0{,}0832/\left(0{,}009 \cdot 10^{-3}\right) = 54800;$$

čia $\mu = 0{,}009 \cdot 10^{-3}$ Pa·s – 20 °C temperatūros vandenilio dinaminė klampa (II pav.).

Plieninio vamzdžio savitasis šiurkštumas $d/\Delta e = 0{,}301/0{,}0002 = 1510$.

Iš 1.3 pav. matome, jei $Re = 54800$ ir $d/\Delta e = 1510$, tai $\zeta = 0{,}029$. Todėl pirmojo skaičiavimo metu parinktas $\zeta = 0{,}011$ buvo neteisingas.

Gavę naują ζ vertę, apskaičiuojame kitą vamzdžio skersmenį:

$$d = \left[\frac{0{,}029 \cdot 2000(420/3600)^2}{2 \cdot 120 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}0832 \cdot 0{,}785^2}\right]^{\frac{1}{5}} = 0{,}346 \text{ m}$$

ir naują greičio vertę:

$$w = V_s/\left(0{,}785 \cdot d^2\right) = 1{,}40/\left(0{,}785 \cdot 0{,}346^2 = 14{,}9\right) \text{ m/s}.$$

Naujos Reinoldso ir lyginamojo šiurkštumo vertės:

$$Re = 14{,}9 \cdot 0{,}346 \cdot 0{,}0832/\left(0{,}009 \cdot 10^{-3}\right) = 47600,$$

$$d/\Delta e = 0{,}346/0{,}0002 = 1730.$$

Pagal jas iš 1.3 pav. randama pakoreguota ξ vertė lygi 0,024.

Galima dar kartą patikslinti skaičiavimus pagal tas pačias lygtis. Tada gauname:

$D = 0{,}352$ m; $w = 14{,}4$ m/s; $Re = 46800$.

Tai ir yra teisingos skaičiuojamų parametrų vertės.

1.20. Pvz. Apskaičiuoti būtiną slėgį 100 km ilgio ir 316 mm skersmens vamzdyno pradžioje, jei juo transportuojamas 600 kg/h 15 °C temperatūros metanas. Dujų slėgis vamzdyno pabaigoje P_{abs} = 1,5 at, trinties koeficientas $\zeta = 0{,}025$. Į kitus nuostolius neatsižvelgiama.

S p r e n d i m a s. Kad būtų galima dujas transportuoti vamzdynu, reikalingas tam tikras slėgių skirtumas vamzdyno pradžioje ir pabaigoje. (1.27) lygtį užrašome diferencialine forma:

$$-dp = \frac{\xi}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} \cdot dL;$$

čia *Re* ir ξ – pastovios vertės visame vamzdyno ilgyje, o minuso ženklas rodo, kad slėgis mažėja srauto judėjimo kryptimi.

Pagal vamzdžio ilgį besikeičiančios ρ ir w vertės apskaičiuojamos pagal idealių dujų būvio lygtį (1.1), esant vandenilio slėgiui ir temperatūrai normalioms sąlygoms:

$$\rho = \rho_0 \cdot p \cdot T_0/(p_0 \cdot T) \quad \text{ir} \quad w = w_0 \cdot p \cdot T_0/(p_0 \cdot T).$$

Gautas vertes įrašę diferencialinės lygties dešinėje pusėje ir lygtį suintegravę, gauname:

$$p_{prad}^2 - p_{gal}^2 = \frac{\xi}{d} \cdot \frac{\rho_0 \cdot w_0^2}{2} \cdot \frac{T}{T_0} \cdot p_0 \cdot L.$$

Dujų greitis normaliomis sąlygomis:

$$w_0 = (6000/3600/0{,}714)/(0{,}785 \cdot 0{,}316^2) = 29{,}7 \text{ m/s};$$

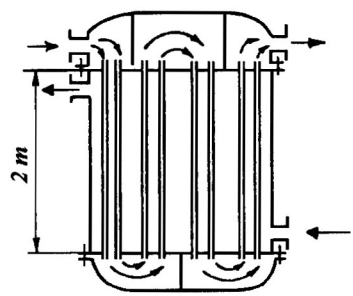
čia $\rho_0 = 16/22{,}4 = 0{,}714$ kg/m^3 – metano tankis normaliomis sąlygomis.

Slėgis vamzdžio pradžioje apskaičiuojamas:

$$p_{prad} = \left[(1{,}5 \cdot 9{,}81 \cdot 10^3)^2 + \frac{0{,}025}{0{,}316} \cdot \frac{0{,}714 \cdot 29{,}7^2}{2} \cdot \frac{273+15}{273} \cdot 101300 \cdot 100 \cdot 10^3 \right]^{0,5} =$$

$= 5{,}37 \cdot 10^5$ Pa.

1.21. Pvz. Keturių ėjų vamzdiniame šilumokaityje (1.11 pav.), turinčiame 206 vamzdžius, kurių ilgis 2 m ir skersmuo (25×2) mm, 17 kg/s debitu šildoma acto rūgštis, esant jos vidutinei 47 °C temperatūrai. Vidutinė vamzdžių sienelės temperatūra rūgšties pusėje 88 °C. Įtekėjimo ir ištekėjimo iš tarpvamzdinės ertmės atvamzdžių skersmuo (159×4,5) mm. Apskaičiuoti būtiną slėgių skirtumą atvamzdžių galuose.



1.11 pav. Keturių ėjų šilumokaitis (1.21. Pvz.)

S p r e n d i m a s. Rūgšties tekėjimo greitis vamzdžiuose:

$$w = \frac{17/1060}{(206/4) \cdot 0{,}785 \cdot 0{,}021^2} = 0{,}90 \text{ m/s};$$

čia $\rho = 1060$ kg/m^3 – rūgšties tankis (II lentelė); 206/4 – vamzdžių skaičius vienoje ėjoje; 0,021 – vidinis vamzdžio skersmuo, m.

Reinoldso kriterijaus vertė:

$Re = 0{,}90 \cdot 0{,}021 \cdot 1060/(0{,}85 \cdot 10^{-3}) = 23600$;

čia $\mu = 0{,}85 \cdot 10^{-3}$ Pa·s – 47 °C temperatūros rūgšties dinaminė klampa.

Jei vamzdžiai plieniniai ir jų korozija nežymi Δe = 0,2 mm (IX lentelė), tai $d/\Delta e$ = 21/0,2 = 105. Trinties koeficientas, kai Re = 23600 ir $d/\Delta e$ = 105, lygus ζ = 0,0375 (1.3 pav.).

Slėgio nuostoliai dėl trinties apskaičiuojami:

$$\Delta p_{tr} = 0{,}0375 \cdot \frac{2{,}0}{0{,}021} \cdot \frac{1060 \cdot 0{,}90^2}{2} \cdot 4 = 6130 \text{ Pa}.$$

Vietinių kliūčių koeficientų vertės parenkamos iš VII lentelės:

Kliūčių pobūdis	ξ	Suma pagal sąlygą
Įtekant į korpusą ir ištekant iš jo	1,5	1,5·2 = 3,0
Įtekant į vamzdį ir ištekant iš jo	1,0	1,0·8 = 8,0
180° posūkis tarp sekcijų	2,5	2,5·3 = 7,5

Rūgšties greitis įtekėjimo ir ištekėjimo atvamzdžiuose:

$$w_{at} = (17/1060)/(0{,}785 \cdot 0{,}150^2) = 0{,}908 \text{ m/s}.$$

Slėgio nuostoliai įtekėjimo ir ištekėjimo atvamzdyje:

$$\Delta p_{at} = 3{,}0 \cdot 1060 \cdot 0{,}908^2/2 = 1310 \text{ Pa}.$$

Slėgio nuostoliai įtekant į šilumokaičio vamzdžius ir ištekant iš jų:

$$\Delta p_v = 8 \cdot 1060 \cdot 0{,}908^2/2 = 3430 \text{ Pa}.$$

Slėgio nuostoliai dėl srauto posūkio pereinant iš vienos ėjos į kitą:

$$\Delta p_{pos} = 7{,}5 \cdot 1060 \cdot 0{,}90^2/2 = 3220 \text{ Pa}.$$

Suminiai slėgio nuostoliai 47 °C temperatūros srautui dėl vietinių kliūčių:

$$\Delta p_{v.k} = \sum \xi \cdot \rho \cdot w^2/2 = 1310 + 3430 + 3220 = 7950 \text{ Pa}.$$

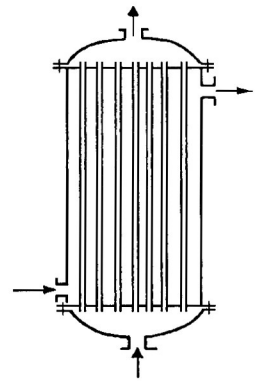
Įvertinę srauto neizoterminį pobūdį (temperatūros skirtumą prie sienelės ir ašyje), skaičiuojame pataisos koeficientą χ pagal (1.32) lygtį. Turbulentiniame sraute:

$$\chi = 1 \cdot (Pr_p/Pr)^{1/3} = (10/12)^{1/3} = 0{,}941.$$

Bendrieji neizoterminio acto rūgšties srauto slėgio nuostoliai tarpvamzdėje erdvėje:

$$\Delta p = (6130 + 7950) \cdot 0{,}941 = 13200 \text{ Pa}.$$

1.22. Pvz. Vamzdinio šilumokaičio tarpvamzdinėje ertmėje (1.12 pav.) 4,5 *l*/s anilino aušinama nuo 110 °C iki 50 °C temperatūros. Anilinas teka išilgai aparato ašies. Korpuso vidinis skersmuo 153 mm, vamzdžių skaičius 19, vamzdžių skersmuo (20×2) mm, ilgis 3,0 m. Vandeniu aušinamų vamzdžių paviršiaus vidutinė temperatūra 25 °C. Apskaičiuoti slėgio nuostolius dėl trinties.



1.12 pav. Vienos ėjos šilumokaitis (1.22. Pvz.)

S p r e n d i m a s. Apskaičiuojame šilumokaičio tarpvamzdinės ertmės tekmės skerspjūvio plotą:

$$f = (\pi / 4)\left(D^2 - n \cdot d^2\right) =$$
$$= 0{,}785 \cdot \left(0{,}153^2 - 19 \cdot 0{,}016^2\right) =$$
$$= 0{,}0146 \text{ m}^2$$

Anilino tėkmės greitis tarpvamzdinėje ertmėje:

$$w = V_s / f = 4{,}5 \cdot 10^{-3} / 0{,}0146 = 0{,}308 \text{ m/s}.$$

Apskaičiuojame tarpvamzdinės ertmės ekvivalentinį skersmenį:

$$d_{ekv} = 4 \cdot f / \Pi = 4 \cdot 0{,}0146 / \left[\pi \cdot (0{,}153 + 19 \cdot 0{,}020)\right] = 0{,}0347 \text{ m}.$$

Tada Reinoldso kriterijus:

$$Re = 0{,}308 \cdot 0{,}0347 \cdot 969 / \left(1{,}1 \cdot 10^{-3}\right) = 9460;$$

čia $\rho = 969$ kg/m^3 ir $\mu = 1{,}1 \cdot 10^{-3}$ Pa·s – anilino tankis ir dinaminė klampa, esant jo vidutinei (110+50)/2 = 80 °C temperatūrai (III lentelė ir I pav.).

Plieninių vamzdžių $\Delta e = 0{,}2$ m (IX lentelė) savitasis šiurkštumas $d_{ekv}/\Delta e = 34{,}7/0{,}2 = 174$. Kai $Re = 9460$ ir $d_{ekv}/\Delta e = 174$, tai trinties koeficientas $\zeta = 0{,}038$ (1.3 pav.).

Slėgio nuostoliai dėl trinties tarpvamzdinėje ertmėje anilino izoterminiam srautui:

$$\Delta p_{tr} = 0{,}038 \cdot \frac{3{,}0}{0{,}0347} \cdot \frac{972 \cdot 0{,}308^2}{2} = 152 \text{ Pa}.$$

Pataisos koeficientas χ neizoterminiam srautui apskaičiuojamas pagal (1.32) lygtį ir laminarinio, ir turbulentinio srauto tekėjimo atvejais.

Prandtlio kriterijaus vertės, esant srauto ir sienelės paviršiaus temperatūroms, parenkamos žinynuose:

$Pr = 12{,}5$ ir $Pr_s = 46$.

Grashofo kriterijaus vertė:

$$Gr = g \cdot d_{ekv}^3 \cdot \beta \cdot \Delta t / \nu^2 = 9{,}81 \cdot 0{,}0347^3 \cdot 0{,}91 \cdot 10^{-3}(80-25)/\left(1{,}13 \cdot 10^{-6}\right)^2 =$$

$$= 16{,}1 \cdot 10^6.$$

čia $\beta = 0{,}91 \cdot 10^{-3}$ K^{-1} – 80 °C temperatūros anilino tūrinis plėtimosi koeficientas; $\nu = \mu/\rho = 1{,}1 \cdot 10^{-3}/972 = 1{,}13 \cdot 10^{-6}$ m^2/s – 80 °C temperatūros anilino kinematinė klampa.

Iš (1.32) lygties apskaičiuojame pataisos koeficientą laminarinio tekėjimo atveju:

$$\chi_l = \left[1 + 0{,}22\left(16{,}1 \cdot 10^6 \cdot 12{,}5/9460\right)^{0{,}15}\right](46/12{,}5)^{1/3} = 1{,}98 \cdot 1{,}54 = 3{,}05.$$

Turbulentinio tekėjimo atveju:

$$\chi_T = (46/12{,}5)^{1/3} = 1{,}54.$$

Esant pereinamajam tekėjimo pobūdžiui, kai nėra kitų nuorodų, imama vidutinė pataisos koeficiento vertė:

$$\overline{\chi} = (\chi_l + \chi_T)/2 = (3{,}05 + 1{,}54)/2 = 2{,}30.$$

Kylant temperatūrai, mažėja anilino klampa, slėgio nuostoliai dėl trinties šilumokaičio tarpvamzdinėje ertmėje padidėja daugiau kaip du kartus:

$$\Delta p_{tr} = 152 \cdot 2{,}30 = 349 \text{ Pa}.$$

1.23. Pvz. Apskaičiuoti siurbliu pasiekiamą slėgio aukštį, jei slėgimo vamzdyne perteklinis slėgis yra 3,8 at, o vakuumetras įsiurbimo linijoje rodo 210 mm Hg. Vertikalus atstumas tarp matavimo taškų 0,410 m. Slėgimo ir įsiurbimo linijose vamzdžių skersmuo atitinkamai 300 mm ir 350 mm. Siurblys transportuoja 8,40 m^3/min vandens. Atmosferinis slėgis 760 mm Hg.

S p r e n d i m a s. Pagal (1.35) lygtį, apskaičiuojame vandens greičius įsiurbimo ir slėgimo linijose:

$$w_{is} = \frac{8{,}40/60}{0{,}785 \cdot 0{,}350^2} = 1{,}46 \text{ m/s};$$

$$w_{sl} = \frac{8{,}40/60}{0{,}785 \cdot 0{,}300^2} = 1{,}98 \text{ m/s}.$$

Absoliutusis slėgis slėgimo ir įsiurbimo linijose:

$$p_{sl} = (1{,}033 + 3{,}8) \cdot 9{,}81 \cdot 10^4 = 474000 \text{ Pa};$$

$$p_{is} = (760 - 210) \cdot 1{,}013 \cdot 10^5 = 73315 \text{ Pa}.$$

Siurbliu sudaromas slėgio aukštis:

$$H = \frac{474000 - 733150}{1000 \cdot 9{,}81} + 0{,}410 + \frac{1{,}98^2 - 1{,}46^2}{2 \cdot 9{,}81} = 40{,}6 \text{ m } H_2O.$$

1.24. Pvz. Apskaičiuoti stūmoklinio siurblio įsiurbimo aukštį, jei siurblys transportuoja 60 °C temperatūros vandenį, esant atmosferiniam 735 mm Hg slėgiui. Suminiai slėgio nuostoliai įsiurbimo linijoje yra 6,5 m H_2O, stūmoklio judėjimo dažnis 150 min^{-1}.

S p r e n d i m a s. Teorinis vandens įsiurbimo aukštis apskaičiuojamas pagal (1.39) lygtį:

$$H_{is} = 0{,}735 \cdot 13600/1000 - 2{,}03 - 6{,}5 = 1{,}47 \text{ m};$$

čia h_t = 19915,02 Pa = 2,03 m H_2O – aukščio nuostoliai, susidarantys dėl sočiųjų garų susidarymo, transportuojant 60 °C temperatūros vandenį (XIV lentelė).

Esant sukimosi dažniui n = 150 min^{-1}, realus įsiurbimo aukštis yra lygus nuliui, todėl siurblys negali siurbti karšto vandens, jis turi dirbti savaime užsipildančiu režimu, t. y. jis turi būti pastatytas žemiau skysčio įsiurbimo lygio.

1.25. Pvz. Viengubo veikimo plunžeriniu siurbliu būtina transportuoti 25,8 m^3/h skysčio. Siurblio stūmoklio skersmuo 160 mm, stūmoklio eiga 200 mm. Skysčio tankis 930 kg/m^3. Skystis transportuojamas iš atviro indo, kuriame slėgis atmosferinis, ir tiekiamas į 20 m aukštyje esantį aparatą, kuriame palaikomas 3,2 at perteklinis slėgis. Slėgio nuostoliai dėl aukščio įsiurbimo linijoje 1,7 m, o slėgimo linijoje 8,6 m. Apskaičiuoti stūmoklio judėjimo dažnį ir sistemos galingumą, jei siurblio tiekimo koeficientas ir siurblio naudingumo koeficientas yra tokie patys – 0,85; reduktoriaus ir elektros variklio naudingumo koeficientas – 0,95.

S p r e n d i m a s. Stūmoklio judėjimo dažnis apskaičiuojamas pagal (1.37) lygtį:

$$n = \frac{(25{,}8/60)}{0{,}85 \cdot 0{,}785 \cdot 0{,}160^2 \cdot 0{,}200} = 126 \text{ min}^{-1}.$$

Bendras siurblio pasiekiamas slėgio aukštis apskaičiuojamas pagal (1.35) lygtį:

$$H = 3{,}2 \cdot 9{,}81 \cdot 10^4 / (930 \cdot 9{,}81) + 19{,}5 + 1{,}7 + 8{,}6 = 64{,}2 \text{ m}.$$

Elektros variklio galia skaičiuojama pagal (1.25) lygtį:

$$N = \frac{(25{,}8/3600)\cdot 930\cdot 9{,}81\cdot 64{,}2}{1000\cdot 0{,}80\cdot 0{,}95\cdot 0{,}95} = 5{,}81\,\text{kW}.$$

Su atsarga, perkrovos atveju, apskaičiuota elektros variklio galia:

$$N_{s,ist} = 1{,}19\cdot 5{,}81 = 6{,}91\,\text{kW}.$$

1.26. Pvz. Apskaičiuoti, kokį slėgių skirtumą turi sudaryti ventiliatorius, kad juo būtų galima transportuoti dujas (tankis 1,2 kg/m^3) iš dujų saugyklos, kurioje yra 60 mm H_2O perteklinis slėgis, į įrenginį, turintį 74 mm H_2O perteklinį slėgį. Dujų greitis slėgimo linijoje 11,0 m/s, slėgio aukščio nuostoliai įsiurbimo ir slėgimo linijose atitinkamai 19 mm H_2O ir 35 mm H_2O.

S p r e n d i m a s. Atskirai apskaičiuojame (1.41) lygtyje esančius narius:

- statinių slėgių skirtumas, lygus srauto savitajai energijai, ištekant iš slėgimo vamzdžio:

$$\rho\cdot w^2/2 = 1{,}2\cdot 11^2/2 = 72{,}6\ \text{Pa};$$

- slėgių skirtumas įsiurbimo ir slėgimo linijose (priešslėgis):

$$p_2 - p_1 = (74-60)\cdot 9{,}81 = 137\ \text{Pa};$$

- suminiai slėgio aukščio nuostoliai įsiurbimo ir slėgimo linijose:

$$p_{is} + p_{sl} = (19+35)\cdot 9{,}81 = 530\ \text{Pa}.$$

Suminis slėgių skirtumas, kurį sudaro ventiliatorius:

$$p = 72{,}6 + 137 + 530 = 740\ \text{mm}\ H_2O.$$

1.27. Pvz. Ventiliatorius transportuoja 3700 m^3/h oro per vienodo skersmens įsiurbimo ir slėgimo vamzdžius. Prieš ventiliatorių yra 16 mm H_2O išretinimas, o slėgimo linijoje yra perteklinis 21 mm H_2O slėgis. Ventiliatoriaus rotoriaus sukimosi dažnis 16 s^{-1}, naudojama galia 0,70 kW. Apskaičiuoti ventiliatoriumi pasiekiamą slėgių skirtumą ir naudingumo koeficientą, taip pat naujas našumo ir galingumo vertes, esant 1150 min^{-1} sukimosi dažniui.

S p r e n d i m a s. Kadangi linijų skersmenys yra vienodi, todėl (1.41) lygtis supaprastėja:

$$p = p_{sl} - p_{is} = 21\cdot 9{,}81 - (-16\cdot 9{,}81) = 363\ \text{Pa}.$$

Teorinė reikalinga galia:

$$N_t = (3700/3600)\cdot 363/1000 = 0{,}373\ \text{kW}.$$

Ventiliatoriaus naudingumo koeficientas:

$\eta = N_t / N = 0{,}373/0{,}7 = 0{,}533 = 53{,}3$ %.

Nauja tūrio debito ir galios vertė, kai ventiliatoriaus rotoriaus sukimosi dažnis $n_2 = 1150$ min^{-1} :

$$V_{s,2} = 3700 \cdot 1150/960 = 4430 \text{ m}^3/\text{s};$$

$$N_2 = 0{,}7 \cdot (1150/960)^3 = 1{,}2 \text{ kW}.$$

1.28. Pvz. Nustatyti, ar tinka viengubo veikimo stūmoklinis kompresorius suslėgti 80 kg/h oro nuo 1 at iki $p_{abs} = 4{,}5$ at. Kompresoriaus cilindro skersmuo 180 mm, stūmoklio eiga 200 mm, judėjimo dažnis 4,0 s^{-1}. Slegiamo oro temperatūra 20 °C. Kenksmingas tūris sudaro 5 % darbinio tūrio, politropės rodiklis, plečiantis kenksmingo tūrio orui, $m = 1{,}25$.

S p r e n d i m a s. Kompresoriaus tūrinis našumas apskaičiuojamas pagal (1.42) lygtį:

$$V_s = 0{,}748 \cdot 0{,}785 \cdot 0{,}18^2 \cdot 0{,}2 \cdot 4{,}0 = 0{,}0152 \text{ m}^3/\text{s};$$

čia λ_k – kompresoriaus padavimo koeficientas apskaičiuotas pagal (1.43) lygtį: $\lambda_k = 0{,}875 \cdot \lambda_0 = 0{,}875 \{1\text{-}0{,}05 [((1{,}0 + 4{,}5)/1{,}0)^{1/1.25} - 1]\} = 0{,}748$.

Kompresoriaus našumas masės vienetais:

$$G_s = V_s \cdot \rho_1 = 0{,}0152 \cdot 1{,}206 = 0{,}0183 \text{ kg/s} = 65{,}9 \text{ kg/h}$$

čia $\rho_l = 1{,}206$ kg/m^3 – įsiurbiamo oro tankis, esant atmosferiniam slėgiui ir 20 °C temperatūrai.

Kompresorius negalės užtikrinti 80 kg/h našumo, kad tai pasiekti stūmoklio judėjimo dažnį padidiname nuo 4,0 s^{-1} iki 4,0 (80/65,9) = 4,86 s^{-1}.

1.3. Kontroliniai uždaviniai

1.1. Apskaičiuoti vandens garų molio masę ir tankį. Vandens garų temperatūra 90 °C, absoliutusis slėgis 0,12 MPa, jų tūrio sudėtis: 50 % H_2, 40 % CO, 5 % N_2 ir 5 % CO_2.

1.2. Apskaičiuoti anglies dioksido tankį, esant nurodytoms temperatūroms ir slėgiams:

Eil. Nr.	Slėgis, MPa / Temperatūra, °C	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20
1	50						
2	60						
3	70						
4	80						
5	90						
6	100						
7	110						
8	120						
9	130						
10	140						

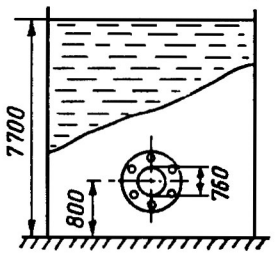
1.3. Degant 1 kg kokso dujų, susidaro tokios sudėties degimo produktai: CO_2 – 1,45 kg, N_2 – 8,74 kg, H_2O – 1,92 kg.

Nustatyti degimo produktų sudėtį tūrio dalimis.

1.4. Slėgis bokštinėje sieros rūgšties džiovykloje yra matuojamas *U* formos manometru, užpildytu 1800 kg/m^3 tankio sieros rūgštimi. Manometro rodmenys – 3 cm. Koks absoliutusis slėgis džiovykloje, jei barometrinis slėgis 750 mm Hg.

1.5. Prie vamzdyno pajungtas skysčiu užpildytas manometras rodo 0,18 kgf/cm^2 slėgį. Į kokį virš manometro tvirtinimo taško aukštį *h* pakils skystis atvirame pjezometre, jei tas skystis: a) vanduo; b) CCl_4?

1.6. Rezervuaras iki 7,6 m užpildytas mazutu, kurio tankis – 960 kg/m^3. 800 mm aukštyje nuo rezervuaro dugno yra įrengta 760 mm skersmens anga, kurios dangtis pritvirtintas 10 mm skersmens plieniniais varžtais. Žinant, kad plieno varžtų leistini įtempimai yra 700 kgf/cm^2, nustatyti būtiną varžtų skaičių. Apskaičiuoti slėgį į rezervuaro dugną (1.13 pav.).



1.13 pav. Skysčio saugykla (1.6. užd.)

1.7. Hidraulinio preso mažąjį 40 mm skersmens stūmoklį veikia 589 N (60 kgf) jėga. Neatsižvelgiant į nuostolius, apskaičiuoti jėgą, kuri veikia gniuždomą kūną didžiuoju 300 mm skersmens stūmokliu.

1.8. 50 °C temperatūros skysčio dinaminė klampa 30 mPa·s. Apskaičiuoti kinematinę klampą, jei skysčio tankis 900 kg/m^3.

1.9. Apskaičiuoti azoto ir vandenilio dujų mišinio dinaminę klampą, jei:

Eil. Nr.	Sudėtis* / Temperatūra, °C	75:25	70:30	65:35	60:40	55:45	50:50
1	50						
2	60						
3	70						
4	80						
5	90						
6	100						
7	110						
8	120						

* – *Mišinio sudėtis (pagal tūrį), pvz., 75 % vandenilio ir 25 % azoto.*

1.10. 30 °C temperatūros tepalo dinaminė klampa 0,331 P, o 50 °C temperatūros siekia 0,176 P. Koks bus 90 °C skysčio dinaminė klampa? Spręsti vadovaujantis tiesine priklausomybe. Standartiniu skysčiu imti 100 % gliceriną.

1.11. Vertikalus šaldytuvas sudarytas iš 19 vamzdžių, kurių skersmuo (20×2) mm. Į šaldytuvą vanduo patenka vamzdynu, kurio skersmuo (57×3,5) mm. Vandens tėkmės greitis vamzdyne 1,4 m/s. Vanduo tiekiamas iš apačios į viršų. Koks vandens greitis šaldytuvo vamzdžiuose?

1.12. Šilumokaičio 379 vamzdžiais tiekiamas azotas 0,3 MPa pertekliniu slėgiu ir 6400 m^3/h debitu (normaliomis sąlygomis). Vamzdžių skersmuo (16×1,5) mm. Apskaičiuoti azoto judėjimo greitį vamzdžių pradžioje, kai azoto temperatūra 120 °C, ir ištekant iš jų, kai azotas atvėsta iki 30 °C.

1.13. Šaldytuvas sudarytas iš dviejų koncentriškų plieninių vamzdžių, kurių skersmuo (29×2,5) mm ir (54×2,5) mm. Vidiniu vamzdžiu teka 3,73 t/h 1150 kg/m^3 tankio tirpalas. Tarpvamzdine ertme 160 kg/h tiekiamos 1,2 kg/m^3 tankio (skaičiuota esant 25 °C temperatūrai ir 760 mm Hg slėgiui) dujos. Apskaičiuoti dujų ir skysčio judėjimo greičius šaldytuve, esant 0,3 MPa absoliučiajam slėgiui.

1.14. 1.13 uždavinio atveju apskaičiuoti būtiną vidinio vamzdžio skersmenį, jei dujos bus tiekiamos atmosferiniu slėgiu, o greitis ir masės debitas liks toks pat.

1.15. Korpusinis vamzdinis šilumokaitis sudarytas iš 61 vamzdžio, kurių skersmuo (38×2,5) mm. Apskaičiuoti ekvivalentinį tarpvamzdinės ertmės skersmenį, jei vidinis korpuso skersmuo 625 mm.

1.16. Nustatyti vandens tekėjimo režimą *vamzdis vamzdyje* tipo šilumokaičio tarpvamzdinėje ertmėje. Išorinio vamzdžio skersmuo (96×3,5) mm, o vidinio vamzdžio (57×3) mm. Vandens debitas 3,6 m^3/h, vidutinė temperatūra 20 °C.

1.17. Nustatyti 52 °C temperatūros etileno tekėjimo režimą:

a) tiesiame (40×2,5) mm skersmens vamzdyje;

b) iš tokio pat vamzdžio pagamintame gyvatuke, kurio skersmuo 570 mm. Etileno tėkmės greitis 0,13 m/s.

1.18. Apskaičiuoti 38 °C temperatūros acto rūgšties vietinį ašinį greitį, jai tekant (57×3,5) mm skersmens vamzdžiu 200 dm^3/h debitu.

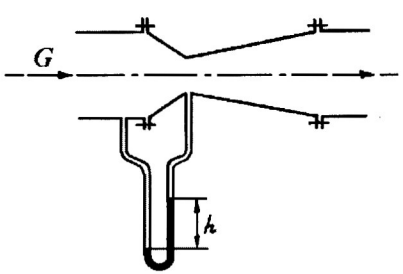
1.19. 320 mm vidinio skersmens vamzdyje įmontuotas Pito-Prandtlio vamzdelis, kurio manometras užpildytas vandeniu. Aukščių skirtumas manometre 5,8 mm. Vamzdžiu tiekiamas sausas 25 °C temperatūros oras. Apskaičiuoti oro masės debitą.

1.20. Atviro 800 mm skersmens indo dugne yra 10 mm skersmens anga. Inde palaikomas pastovus 900 mm vandens lygis. Per angą išteka 750 dm^3/h vandens. Apskaičiuoti angos debito koeficientą. Per kiek laiko ištuštės talpa, jei vanduo į jį nebus tiekiamas?

1.21. Iš 3 m^2 skerspjūvio ploto slėgimo indo vanduo teka pro dugne esančią ištekėjimo angą. Nusistovėjus tekėjimui, kai įtekančio vandens kiekis lygus ištekančiam kiekiui, vandens lygis nusistovi 1 m aukštyje. Jei vandens tiekimą nutrauksime, tai indas ištuštės per 100 s. Apskaičiuoti vandens tiekimo debitą.

1.22. Horizontaliu 200 mm vidinio skersmens vamzdžiu teka mineralinis tepalas, kurio tankis 900 kg/m^3. Vamzdyje įstatyta diafragma, kurios debito koeficientas 0,61. Diafragmos angos skersmuo 76 mm. Gyvsidabrinis manometras, prijungtas abipus diafragmos, rodo 102 mm slėgių skirtumą. Apskaičiuoti tepalo greitį vamzdyje ir jo debitą.

1.23. Vamzdyje, kurio skersmuo (160×5) mm, debitui matuoti įtaisytas Venturi vamzdis (1.14 pav.), kurio vidinis skersmuo 60 mm. Vamzdžiu, esant 25 °C temperatūrai ir atmosferiniam slėgiui, teka etanas. Venturi vamzdžio manometras, užpildytas vandeniu, rodo aukščių skirtumą $h = 32$ mm. Apskaičiuoti etano masės debitą, jei debito koeficientas 0,97.



1.14 pav. Debito matavimas Venturi vamzdžiu (1.23. užd.)

1.24. Apskaičiuoti slėgio nuostolius dėl trinties, vandeniui tekant šiurkščiu (19×2) mm skersmens 10 m ilgio vamzdžiu. Vandens greitis 2 m/s, temperatūra 55 °C. Vamzdžio šiurkštumo Δe = 0,005 mm.

1.25. Apskaičiuoti slėgio nuostolius dėl trinties švininiame gyvatuke, kuriuo 60 % sieros rūgšties teka 0,7 m/s greičiu, esant vidutinei 55 °C temperatūrai. Vamzdžio šiurkštumo Δe = 0,0075 mm. Vamzdžių vidinis skersmuo 50 mm, gyvatuko skersmuo 800 mm, vijų skaičius 20. Gyvatuko viso vamzdžio ilgį skaičiuoti apytiksliai, vienos vijos ilgį prilyginus apskritimo ilgiui.

1.26. 200 mm skersmens ir 1000 m ilgio plieniniu vamzdžiu transportuojamas vandenilis 120 kg/h debitu, esant 1530 mm Hg absoliučiajam slėgiui ir 27 °C temperatūrai. Apskaičiuoti slėgių nuostolius dėl trinties.

1.27. Apskaičiuoti slėgio nuostolius dėl trinties, susidarančius 50 m ilgio ir (180×4) mm skersmens plieniniame vamzdyje, kai juo 25 m/s greičiu tiekiami 0,6 MPa slėgio sotieji vandens garai.

1.28. Kaip pasikeis slėgio nuostoliai dėl trinties dujotiekyje, kuriuo pastoviu masės debitu transportuojamas azotas, jei:

a) transportuojamo azoto absoliutųjį slėgį padidintume nuo 0,1 MPa iki 1 MPa, nekeisdami temperatūros;

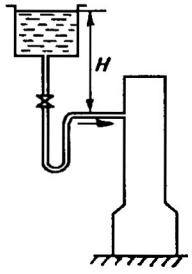
b) nekeisdami slėgio, azotą pašildytume nuo 0 °C iki 100 °C temperatūros.

1.29. Vandentiekio vamzdžiu teka 10 m^3/h vandens. Kiek vandens per valandą pratekėtų du kartus didesnio skersmens vamzdžiu, jei slėgio nuostoliai būtų tokie patys? Trinties koeficientą laikyti pastoviu, o tekėjimo pobūdį – turbulentiniu.

1.30. Tiesiu horizontaliu 150 m ilgio vamzdžiu reikia tiekti 10 m^3/h tirpalo. Leidžiami slėgio nuostoliai 10 m. Apskaičiuoti reikalingą vamzdžio skersmenį, jei trinties koeficientas ξ = 0,03.

1.31. Kaip pasikeis slėgio nuostoliai dėl trinties, jei, nekeičiant skysčio debito, vamzdžio skersmenį sumažinsime du kartus? Abiem atvejais tekėjimas yra laminarinio pobūdžio.

1.32. Skystis, kurio tankis 900 kg/m^3, į rektifikacijos koloną (1.15 pav.) patenka savitaka iš slėgimo indo, kuriame palaikomas atmosferinis slėgis. Manometrinis slėgis kolonoje 40 kPa. Kokiame aukštyje x turi būti skysčio lygis slėgimo inde nuo padavimo į koloną taško, kad skysčio greitis vamzdyje būtų 2 m/s? Slėgio aukščio nuostoliai dėl trinties ir vietinių kliūčių 2,5 m. Sprendimui taikyti Bernulio lygtį.



1.15 pav. Skysčio tiekimas į rektifikacijos koloną (1.32. užd.)

1.33. 86 % glicerino tirpalas iš slėgimo indo į talpą teka (29×2) mm vamzdžiu. Skysčio lygių skirtumas 10 m. Bendras vamzdžio ilgis 110 m. Koks tirpalo debitas, jeigu jo tankis 1230 kg/m^3, o dinaminė klampa 97 mPa·s? Į vietinius pasipriešinimus nekreipti dėmesio. Tekėjimo pobūdis – laminarinis, inde palaikomas pastovus vandens lygis.

1.34. Siurbliu iš reaktoriaus į slėgimo indą transportuojamas 45 °C temperatūros chlorbenzenas. Chlorbenzeno masės debitas 20 t/h. Reaktoriuje virš skysčio palaikomas 200 mm gyvsidabrio stulpelio vakuumas, o inde – atmosferinis slėgis. Vamzdyną sudaro nežymiai korodavę plieniniai vamzdžiai, kurių skersmuo (76×4) mm, bendras ilgis 26,6 m. Vamzdyje įrengtos dvi sklendės, diafragma (d_0 = 48 mm) ir penkios 90° alkūnės (R_0/d = 3). Chlorbenzenas transportuojamas į 15 m aukštį. Apskaičiuoti kokio galingumo turi būti siurblys, jei bendras sistemos naudingumo koeficientas 0,7.

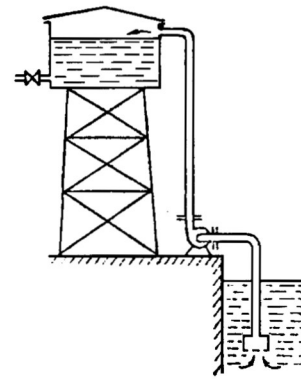
1.35. Korpusinį vamzdinį šilumokaitį sudaro 187 nežymiai koroduoti plieniniai vamzdžiai (Δe = 0,2), kurių skersmuo (18×2) mm, ilgis 1,9 m. Korpusas pagamintas iš (426×12) mm vamzdžio. Tarpvamzdine ertme lygiagrečiai vamzdžių ašims, esant atmosferiniam slėgiui ir 10 °C temperatūrai, tiekiamas azotas 3000 m^3/h debitu. Įtekėjimo ir ištekėjimo vamzdžių skersmuo 250 mm. Apskaičiuoti nuostolius tarpvamzdinėje ertmėje.

1.36. *Vamzdis vamzdyje* tipo šilumokaityje, susidedančiame iš dviejų koncentriškų vamzdžių, kurių skersmuo (44,5×3,5) mm ir (89×5) mm, aušinamas 1900 kg/h toluenas nuo 70 °C iki 30 °C temperatūros. Toluenas tiekiamas tarpvamzdine ertme, o vidiniu vamzdžiu teka 14 °C temperatūros vanduo, kuris sušyla iki 21 °C. Apskaičiuoti slėgio nuostolius dėl trinties 1 m vamzdžio ilgyje ir toluenui, ir vandeniui, jei plieniniai vamzdžiai yra nežymiai korodavę, o vidutinė vamzdžio sienelės temperatūra 25 °C.

1.37. Apskaičiuoti siurblio galingumą, kurio reikia, kad būtų galima transportuoti 4,6 m^3/h 25 % $CaCl_2$ tirpalą iš šaldomojo įrenginio į kondensatorių, kuris įrengtas virš rektifikacijos kolonos. Pakėlimo aukštis 16 m, tirpalo dinaminė klampa 9,5 mPa·s, jo tankis 1200 kg/m^3, vamzdyno skersmuo (32×2,5) mm, bendras ilgis 80 m. Plieniniai vamzdžiai nežymiai korodavę. Linijoje yra šešios 90° alkūnės (R_0/d = 4) ir keturios sklendės. Bendras sistemos naudingumo koeficientas 0,5.

1.38. Plieniniu vamzdynu, kurio vidinis skersmuo 75 mm, reikia transportuoti 25 m^3/h skystį, kurio tankis 1200 kg/m^3, dinaminė klampa 1,7 mPa·s. Aukščiausias vamzdyno taškas yra 24 m aukščiau pradinio. Vamzdyno ilgis 112 m. Vamzdyne įrengti du ventiliai ir penkios stačiakampės atšakos, kurių apvalinimo spindulys 300 mm. Vamzdžiai nežymiai korodavę. Apskaičiuoti reikalingą galingumą, jei sistemos naudingumo koeficientas 0,6.

1.39. 10 °C temperatūros vanduo iš upės į atvirą rezervuarą transportuojamas siurbliu (1.16 pav.). Viršutinis taškas yra 50 m aukščiau už upės vandens lygį. Vamzdynas plieninis, nežymiai korodavęs. Vidinis vamzdžių skersmuo 80 mm, skaičiuojamasis vamzdyno ilgis 165 m. Siurblys tiekia 575 dm^3/min vandens. Kokį galingumą sunaudoja siurblys, jei įrengimo naudingumo koeficientas 0,55?



1.16 pav. Skysčio transportavimas išcentriniu siurbliu (1.39. užd.)

1.40. Tiesiu horizontaliu (400x600) mm stačiakampės formos ortakiu teka 14,4 t/h 27 °C temperatūros ir atmosferinio slėgio oras. Vamzdyno ilgis 60 m. Apskaičiuoti, kokio galingumo turi būti variklis, jei jo naudingumo koeficientas 0,95, ventiliatoriaus 0,60.

1.41. Apskaičiuoti dujopūtės elektros variklio galingumą, jei vamzdyno ilgis 180 m ir vidinis skersmuo 100 mm. Vamzdynu transportuojamas 2 at perteklinio slėgio ir 75 °C temperatūros anglies dioksidas 30 $kg/(m^2 \cdot s)$ masės greičiu. Vamzdžio sienelių šiurkštumas $\Delta e = 0,7$ mm. Vamzdyne įrengta sklendė ir keturios 90° alkūnės. Dujopūtės naudingumo koeficientas 0,7.

1.42. 240 m ilgio ir (27x2,5) mm skersmens vamzdyne, kurio pradžios ir pabaigos taškų aukščių skirtumas 200 mm, savitaka teka nitrobenzenas. Apskaičiuoti 20 °C temperatūros nitrobenzeno debitą.

1.43. Apskaičiuoti suminį slėgio aukštį, kurį pasiekia siurblys, kai juo 960 kg/m^3 tankio skystis transportuojamas iš atviro indo į aparatą, kuriame yra 23 at perteklinis slėgis. Aparatas įrengtas 19 m aukštyje, bendras linijos pasipriešinimas 35 m.

1.44. Siurblio slėgimo linijoje įrengtas manometras rodo 4,8 at slėgį, o vakuumetras to paties skersmens įsiurbimo linijoje 30 mm Hg. Atstumas tarp vakuumetro ir manometro prijungimo taškų 0,5 m. Apskaičiuoti siurbliu pasiektą slėgio aukštį.

1.45. Apskaičiuoti, kokio galingumo turi būti siurblinės elektros variklis, jei siurblinė transportuoja 14 *l*/s 30 % druskos rūgštį ir pasiekia 58 m suminį slėgio aukštį. Naudingumo koeficientai: siurblio – 0,69; reduktoriaus – 0,90; elektros variklio – 0,95.

1.46. Apskaičiuoti siurblio naudingumo koeficientą, kai juo transportuojamas 380 *l*/min toluenas, esant 30 m suminiam slėgio aukščiui ir sunaudojant 2,5 kW galingumą.

1.47. Apskaičiuoti teoriškai leistiną išcentrinio siurblio įsiurbimo aukštį, jei transportuojamas 140 m^3/h 30 °C temperatūros vanduo. Atmosferinis slėgis 745 mm Hg, sukimosi dažnis 1800 min^{-1}, suminiai aukščio nuostoliai įsiurbimo linijoje 4,2 m.

1.48. Apskaičiuoti būtiną slėgio aukštį ir sunaudojamą galingumą, jei išcentriniu siurbliu (70×2,5) mm skersmens vamzdynu būtina transportuoti 15 m^3/h anilino iš atviro indo į aparatą, kuriame perteklinis slėgis 0,3 at. Pakėlimo aukštis 8,5 m, vamzdyno skaičiuojamasis ilgis 124 m, trinties koeficientas vamzdyne $\xi = 0,03$, siurblio naudingumo koeficientas 0,55.

1.49. Apskaičiuoti siurblio našumą, pasiektą slėgio aukštį, sunaudojamą galingumą ir naudingumo koeficientą, kai apsisukimo dažnis 1450 min^{-1}, jei esant $n_1 = 1140$ min^{-1}, tas pats siurblys turi tokius darbinius parametrus: $V_s = 15,6$ *l*/s; $H = 42$ m ir $N = 11$ kW.

1.50. Apskaičiuoti būtiną ventiliatoriaus variklio galingumą, jei, esant naudingumo koeficientui 0,65 ir našumui 6600 m^3/h, pasiekiamas 850 Pa suminis slėgis.

1.51. Ventiliatorius, kurio rotorius sukasi 960 min^{-1} dažniu, transportuoja 3200 m^3/h oro, sunaudodamas 0,8 kW galią, pasiekia perteklinį 44 mm H_2O slėgio aukštį. Apskaičiuoti ventiliatoriaus našumą, perteklinį slėgio aukštį, naudojamą galingumą ir naudingumo koeficientą, kai rotoriaus sukimosi dažnis 1250 min^{-1}.

2 dalis. NEVIENALYTĖS SISTEMOS

Nevienalyčių sistemų hidromechanika nagrinėja heterogeninių sistemų perskyrimo procesus bei aparatus tiems procesams atlikti.

2.1. Pagrindiniai dėsningumai ir skaičiavimų lygtys

1. Nusodinimas sunkio jėga. Rutulio formos dalelių, veikiamų tik sunkio jėgos, nusodinimo greitis w_n apskaičiuojamas pagal Stokso lygtį, jei dalelės nusodinimas yra laminarinio pobūdžio:

$$w_n = \frac{Ar \cdot \mu_t}{18 \cdot d \cdot \rho_t} = \frac{d^2 \cdot (\rho - \rho_t) \cdot g}{18 \cdot \mu_t}; \qquad (2.1)$$

čia ρ ir ρ_t – dalelės ir aplinkos (terpės) tankis, kg/m^3; g = 9,81 m/s^2; d – dalelės skersmuo, m; μ_t – aplinkos dinaminė klampa, Pa·s; $Ar = f(Re, Ly)$ – Archimedo kriterijus; $Ly = Re^3/Ar$ – Liaščenkos kriterijus:

$$Ly = w_n^2 \cdot \rho_t^{\,2} / [\mu_t \cdot (\rho - \rho_t) \cdot g], \qquad (2.2)$$

$$Ar = \frac{d_{ekv}^{\,3} \cdot (\rho - \rho_t) \cdot \rho_t \cdot g}{\mu_t^2}. \qquad (2.3)$$

Nusodinant daleles dujinėje aplinkoje, jei slėgiai nedideli, (2.1) lygtyje dujų tankio ρ_t galima nevertinti, tada:

$$w_n = d^2 \cdot \rho \cdot g / (18 \cdot \mu_t). \qquad (2.1a)$$

Rutulio formos dalelių laminarinis nusodinimo pobūdis yra tada, kai $Re_n = w_n \cdot \rho / \mu_t < 2$ ir Ar < 36.

Jei gauta Reinoldso kriterijaus vertė $Re_n > 2$, tada w_n skaičiavimui galima naudoti kitas tame tarpe ir kriterijų lygtis:

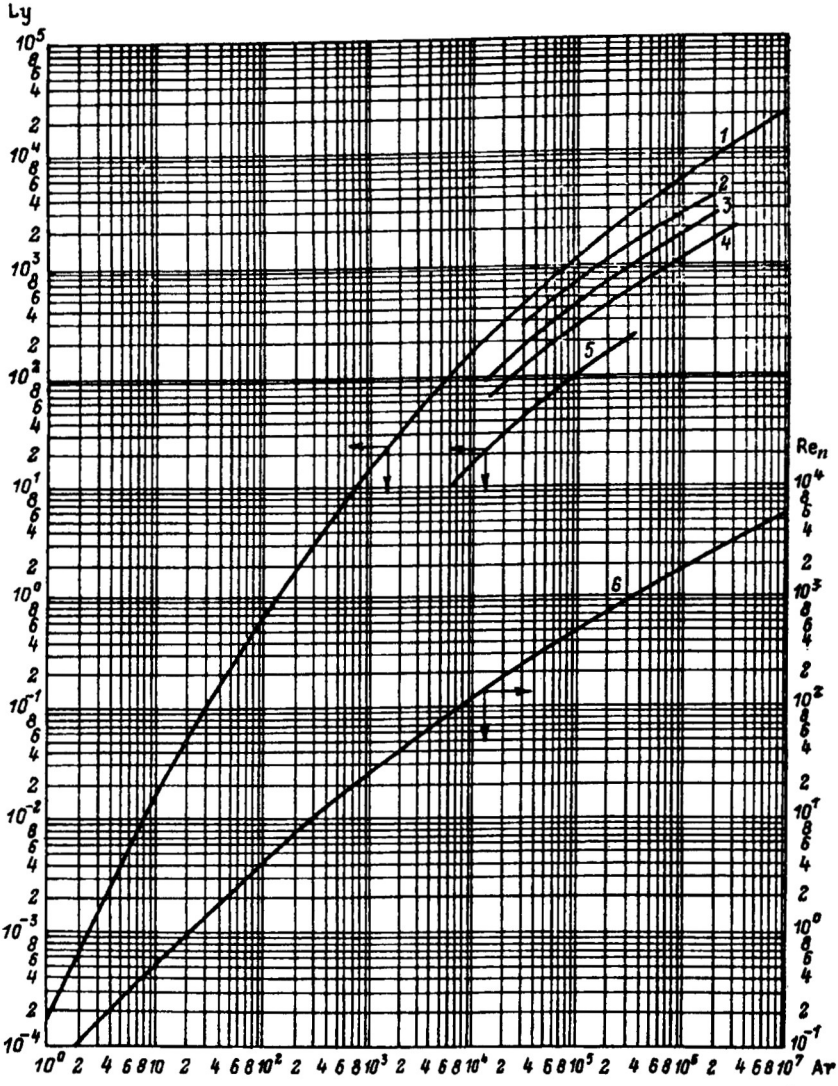
- pereinamojo nusodinimo atveju, kai $36 < Ar < 83000$

$$w_n = 0{,}152 \frac{\mu_t}{d \cdot \rho} Ar^{0{,}715}; \qquad (2.1b)$$

- turbulentinio nusodinimo atveju, kai $Ar > 83000$

$$w_n = 1{,}74 \frac{\mu_t}{d \cdot \rho} \sqrt{Ar}. \qquad (2.1c)$$

Universalus atskirų dalelių nusodinimo greičio skaičiavimo metodas tinka ne tik laminarinio nusodinimo atveju, bet ir pereinamuoju bei turbulentiniu atvejais. Šis metodas remiasi eksperimentiškai nustatytomis $Ar = f(Re, Ly)$ kreivėmis, kurios pateiktos 2.1 pav. Šis grafikas padeda spręsti dalelių nusodinimo greičio ir jų skersmens skaičiavimo uždavinius.



2.1 pav. Eksperimentiškai nustatyta *Ly* ir Re_n kriterijų priklausomybė nuo *Ar* kriterijaus, kai pavienės dalelės nusėda nejudamoje terpėje: *1* ir *6* – rutulio formos, *2* – suapvalintos, 3 – kampuotos, 4 – pailgos, *5* – plokščios dalelės

Jei žinomas nusodinamų dalelių skersmuo, tai apskaičiuojamas Archimedo kriterijus ir grafike parenkamas Liaščenkos kriterijus, pagal kurį apskaičiuojamas nusodinimo greitis w_n:

$$w_n = \sqrt[3]{Ly \cdot \mu_t \cdot (\rho - \rho_t) \cdot g / \rho_t^2}\ .$$

Jei sprendžiamas atvirkščias uždavinys, t. y., kai žinomas nusodinimo greitis, tada apskaičiuojamas *Ly*, po to iš 2.1 pav. pagal *Ly* arba *Re* vertę parenkamas *Ar* ir pagal jį apskaičiuojamas dalelių skersmuo:

$$d_{ekv} = \sqrt[3]{\frac{Ar \cdot \mu_t^2}{(\rho - \rho_t) \cdot \rho_t \cdot g}}\ .$$

Netaisyklingos formos dalelių ekvivalentinis skersmuo d_{ekv} apskaičiuojamas taip:

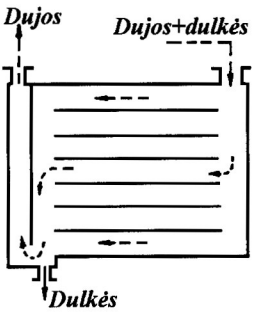
$$d_{ekv} = \sqrt[3]{6 \cdot V / \pi} = 1{,}24 \cdot \sqrt[3]{M / \rho}\ ;$$

čia V, ρ ir M – dalelių tūris, tankis ir masė, m^3, kg/m^3 ir kg.

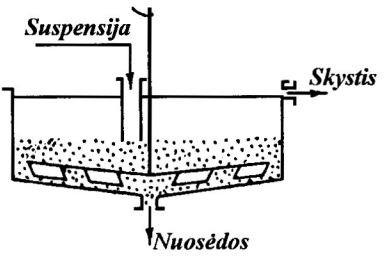
Kietoms dalelėms nusodinti naudojant dulkių nusodinimo kameras (2.2 pav.) arba nusodintuvus (2.3 pav.), jų būtinas nusodinimo plotas S_n apskaičiuojamas:

$$S_n = V / w_n^1\ ; \qquad (2.4)$$

čia V – suspensijos (dulkių) tūrio debitas, m^3/s; w^l_n – tikrasis nusodinimo greitis, m/s. Pagal Stokso lygtį yra apskaičiuojamas vienos atskiros dalelės nusodinimo greitis. Realiomis sąlygomis dėl kitų dalelių stabdymo šis greitis yra žymiai mažesnis. Apytiksliuose skaičiavimuose $w^l_n \cong w_n/2$.



2.2 pav. Dulkių kameros schema



2.3 pav. Nuolatinio veikimo nusodintuvo schema

Nuolatinio veikimo nusodintuvuose (2.4) lygtis užrašoma ir tokia išraiška:

$$S_n = G_{pr}\left(1 - c_{pr} / c_{gal}\right) / \left(\rho \cdot w_n^l\right); \qquad (2.5)$$

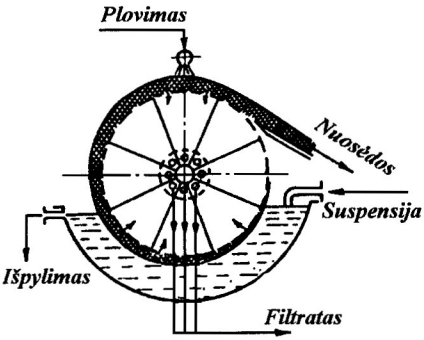
čia G_{pr} – pradinės suspensijos masės debitas, kg/s; c_{pr}, c_{gal} – kietų dalelių masės dalis prieš sutirštinimą ir sutirštintoje suspensijoje, kg/kg; ρ – aplinkos (terpės) tankis, kg/m^3.

2. Filtravimas sudarant slėgių skirtumą abipus filtruojančios pertvaros. Esant pastoviam slėgio skirtumui abipus filtruojančios pertvaros $\Delta p = const$, filtravimo greitis $dV/d\tau$, $m^3/(m^2 \cdot s)$, per nespūdžias nuosėdas proporcingas Δp ir atvirkščiai proporcingas nuosėdų sluoksnio ir pertvaros hidraulinių pasipriešinimų sumai. Be to, nuosėdų sluoksnio pasipriešinimas proporcingai didėja filtrato tūriui V, m^3/m^2, praėjusiam nuo filtravimo pradžios ($\tau = 0$) per filtruojančios pertvaros ploto vienetą (1 m^2):

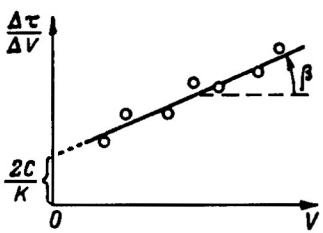
$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{K}{2 \cdot (V + C)}; \qquad (2.6)$$

čia K – filtravimo konstanta, m^2/s, įvertinanti proceso varos jėgą – slėgių skirtumą Δp, nuosėdų sluoksnio savitąjį pasipriešinimą, filtrato klampą ir tankį; C – filtravimo konstanta, įvertinanti filtruojančios pertvaros hidraulinius pasipriešinimus, m^3/m^2; τ – filtravimo trukmė nuo proceso pradžios, s; V – nuo proceso pradžios per 1 m^2 pratekėjęs filtrato kiekis, m^3/m^2.

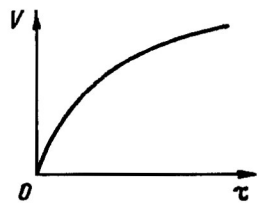
Konstantų K ir C vertės nustatomos grafiškai pagal eksperimentinius duomenis (2.5 pav.), gaunamus periodinio filtravimo metu. Pagal (2.6) lygtį ši priklausomybė yra tiesinė. Tiesės polinkio kampo $tg\beta = 2/K$, o šia tiese ordinatės ašyje atkirsta atkarpa (kai $V = 0$) lygi $2C/K$. Pagal nustatytą pasvirimo kampo β tangentą nustatoma K vertė, o pagal atkarpos ordinatės ašyje dydį nustatome ir C vertę.



2.4 pav. Būgninio vakuuminio filtro schema



2.5 pav. Eksperimentinė $\Delta\tau/\Delta V$ priklausomybė nuo surinkto filtrato tūrio V



2.6 pav. Surinkto filtrato tūrio priklausomybė nuo trukmės

Per nuosėdų sluoksnio ir filtruojančios pertvaros 1 m^2 plotą per trukmę τ nuo filtravimo pradžios pratekėjęs filtrato tūris V apskaičiuojamas integruojant (2.6) lygtį:

$$V^2 + 2 \cdot V \cdot C = K^{\tau}. \qquad (2.7)$$

Šios lygties sprendimo grafinė interpretacija pavaizduota 2.6 pav.

Po filtravimo drėgnos nuosėdos plaunamos, iš nuosėdų pašalinamas filtratas. Plovimo greitis lygus filtravimo greičiui, esant maksimaliam nuosėdų sluoksnio storiui filtravimo pabaigoje. Jei plovimo skysčio klampa bei tankis yra artimi filtrato klampai ir tankiui, tai pastovus plovimo greitis apskaičiuojamas pagal (2.6) lygtį, kai $V = V_M$, t. y. pagal filtrato kiekį, gautą viso filtravimo metu. Bendruoju atveju plovimo stadijos konstantos turi būti nustatomos eksperimentiškai, naudojant plovimo skystį.

Filtrato koncentracijos c_{pl} plovimo skystyje mažėjimas apskaičiuojamas:

$$c_{pl} / c_{pl,0} = exp\left(-K_{pl} \cdot w_{pl} \cdot \tau / \delta_{sl}\right); \qquad (2.8)$$

čia $c_{pl,0}$ – filtrato koncentracija plovimo skystyje proceso pradžioje (τ = 0); K_{pl} – koeficientas, įvertinantis filtrato patekimo į plovimo skystį greitį; w_{pl} – plovimo skysčio savitasis tūrio debitas, $m^3/(m^2 \cdot s)$; δ_{sl} – nuosėdų sluoksnio storis, m; τ – plovimo trukmė, s.

Dydžių $c_{pl,0}$ ir K_{pl} vertės nustatomos eksperimentiškai, plaunant konkrečias nuosėdas.

Sausos medžiagos masė G_K, kg/m^2, surinkta ant filtruojančios pertvaros 1 m^2 drėgnų nuosėdų sluoksnio yra proporcinga bendram gaunamo filtrato tūriui V, m^3/m^2, filtrato tankiui ρ, kg/m^3, ir priklauso nuo kietos fazės dalelių kiekio suspensijoje prieš filtravimą x masės dalimis:

$$G_K = V \cdot \rho \cdot x / (1 - m \cdot x). \qquad (2.9)$$

Kietos fazės koncentracija suspensijoje x, kg/kg, gali būti išreikšta per suspensijos tankį ρ_s, kietos fazės tankį ρ_K ir filtrato tankį ρ:

$$x = \frac{(\rho_s - \rho) \cdot \rho_k}{(\rho_k - \rho) \cdot \rho_s}. \qquad (2.10)$$

Suspensijos tankis apskaičiuojamas:

$$\rho_s = \frac{n+1}{1/\rho_k + n/\rho}; \qquad (2.11)$$

čia n – skystos fazės masė suspensijoje tenkanti kietos fazės masės vienetui.

Valant dulkes nuo kietų dalelių rankoviniuose filtruose, jo filtravimo paviršiaus plotas S, m^2, apskaičiuojamas taip:

$$S = V_s / v_1; \qquad (2.12)$$

čia V_s – užterštų dujų tūrio debitas, m^3/s; v_l – užterštų dujų savitasis tūrio debitas, tenkantis filtruojančio paviršiaus vienam kvadratiniam metrui, $m^3/(m^2 \cdot s)$.

Remiantis pramoninių rankovinių filtrų eksploatacijos duomenimis, v_l gali būti $(3,5–17)\cdot10^{-3}$ $m^3/(m^2\cdot s)$; atskiriant stambesnes daleles 1 m^2 filtro apkrova gali padidėti iki $v_l = (3,5–17)\cdot10^{-3}$ $m^3/(m^2\cdot s)$.

3. Nusodinimas išcentrine jėga. Ciklonuose atskiriant dulkių daleles nuo dujų, kai srauto tūrio debitas V_s, m^3/s, ciklono cilindrinės dalies skersmuo D, m, apskaičiuojamas pagal dujų sąlyginį greitį w_s:

$$D = \sqrt{V_s / (0{,}785 \cdot w_s)}\,. \qquad (2.13)$$

Naudojantis praktiniais rezultatais, rekomenduotina w_s vertė yra 2,5–4,0 m/s. Slėgio nuostoliai ciklone apskaičiuojami pagal lygtį:

$$\Delta p = \zeta_0 \cdot \rho \cdot w_s^2 / 2\,, \qquad (2.14)$$

čia $\zeta_0 = 60–250$ – ciklono pasipriešinimo koeficientas.

Išcentrinė jėga F_c, N, susidaranti centrifugos būgne, kurios skersmuo $D = 2\cdot R$, besisukant suspensijai ir nuosėdoms masės M, kg, apskaičiuojama:

$$F_c = M \cdot \omega^2 \cdot R = 19{,}7 \cdot M \cdot n^2 \cdot D\,; \qquad (2.15)$$

čia $\omega = 2\cdot\pi\cdot n$ – būgno sukimosi kampinis greitis, rad/s; n – sukimosi dažnis, s^{-1}.

4. Maišymas skystoje terpėje. Maišymo hidrodinaminio panašumo kriterijai apskaičiuojami taip:

Reinoldso kriterijus:

$$Re_{išc} = \rho \cdot n \cdot d^2 / \mu\,. \qquad (2.16)$$

Kritinė jo vertė: $Re_{išc,kr} \approx 50$.

Frudo kriterijus:

$$Fr_{išc} = n^2 \cdot d / g\,; \qquad (2.17)$$

Eulerio kriterijus:

$$Eu_m = N / (\rho \cdot n^3 \cdot d^5)\,. \qquad (2.18)$$

čia N – maišymui reikalinga galia, W; ρ – skysčio tankis, kg/m^3; μ – skysčio dinaminė klampa, Pa·s; n – maišiklio sukimosi dažnis, s^{-1}; d – maišiklio skersmuo, m; $g = 9{,}81$ m/s^2.

Maišymui reikalingo galingumo bendroji kriterijų lygtis:

$$Eu_m = (Re_{išc}\, Fr_{išc}, \Gamma_D, \Gamma_b, \Gamma_{H_0}, \ldots). \qquad (2.19)$$

Paprastai sunkio jėga nevertinama, todėl:

$$Eu_m = \left(Re_{išc}, \Gamma_D, \Gamma_b, \Gamma_{H_0}, \ldots\ldots\right); \qquad (2.20)$$

čia $\Gamma = D/d$; $\Gamma_b = b/d$; $\Gamma_{H_0} = H_0/d$ – maišiklio konstrukciją charakterizuojantys geometrinio panašumo simpleksai (taip pat šie kriterijai charakterizuoja skysčio sluoksnio aukštį ir kitus geometrinius faktorius); d – maišiklio skersmuo, m; D – indo skersmuo, m; b – maišiklio mentės plotis, m; H_0 – skysčio sluoksnio aukštis, m.

Geometriškai panašių aparatų su maišikliais apibendrinta kriterijų lygtis:

$$Eu_m = C / Re_{išc}^m ; \qquad (2.21)$$

čia C ir m – maišymo konstantos, charakterizuojančios maišiklį.

2.2. Uždavinių sprendimo pavyzdžiai

2.1. Pvz. Apskaičiuoti rutulio formos kvarcinio smėlio dalelių nusodinimo vandenyje greitį. Dalelių skersmuo 0,9 mm, tankis 2650 kg/m^3, vandens temperatūra 20 °C.

S p r e n d i m a s. Apskaičiuojamas Ar kriterijus:

$$Ar = \frac{d^3 \cdot (\rho - \rho_t) \cdot \rho_t \cdot g}{\mu_t^2} = \frac{0{,}9^3 \cdot 10^{-9} (2650 - 1000) \cdot 1000 \cdot 9{,}81}{10^{-6}} = 1{,}18 \cdot 10^4 ;$$

čia $\mu_t = 1 \cdot 10^{-3}$ Pa·s – 20 °C temperatūros vandens dinaminė klampa (I pav.).

Pagal Ar = 1180 iš 2.1 pav. nustatome, kad Re = 140. Kvarcinio smėlio dalelių teorinis nusodinimo greitis:

$$w_n = \frac{Re \cdot \mu_t}{d \cdot \rho_t} = \frac{140 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{0{,}0009 \cdot 1000} = 0{,}15 \text{ m/s.}$$

2.2. Pvz. Apskaičiuoti kampuotų švino dalelių nusodinimo 30 °C temperatūros vandenyje greitį. Dalelių ekvivalentinis skersmuo 1,0 mm, tankis 7560 kg/m^3.

S p r e n d i m a s. Pagal (2.3) lygtį apskaičiuojamas Archimedo kriterijus:

$$\text{Ar} = \left(7560 - 996\right) \cdot 996 \cdot 9{,}81 \cdot (1{,}0 \cdot 10^{-3})^3 / (0{,}804 \cdot 10^{-3})^2 = 9{,}92 \cdot 10^4 ;$$

čia μ = 0,804·10^{-3} Pa·s ir ρ = 996 kg/m^3 – 30 °C temperatūros vandens dinaminė klampa (I pav.) ir tankis (III lentelė).

Iš 2.1 pav. pagal apskaičiuotą Ar vertę parenkamas kampuotos formos dalelių $Ly = 4{,}5 \cdot 10^2$. Pagal (2.2) lygtį apskaičiuojamas teorinis nusodinimo greitis:

$w_n = [4{,}5 \cdot 10^2 \cdot 0{,}804 \cdot 10^{-3} \cdot (7560 - 996) \cdot 9{,}81 / 996^2]^{1/3} = 0{,}287$ m/s.

2.3. Pvz. Apskaičiuoti pailgų anglies dalelių (ρ = 1890 kg/m^3) ir plokščių skalūno dalelių (ρ = 2200 kg/m^3) ekvivalentinį skersmenį, kai dalelės nusodinamos 0,1 m/s greičiu 20 °C temperatūros vandenyje.

S p r e n d i m a s. Pagal (2.2) lygtį apskaičiuojamas *Ly* kriterijus:

- anglies dalelių

$$Ly = 0{,}10^3 \cdot 998^2 / [1{,}005 \cdot 10^{-3} \cdot (1350 - 998) \cdot 9{,}81] = 287;$$

- skalūno dalelių:

$$Ly = 0{,}10^3 \cdot 998^2 / [1{,}005 \cdot 10^{-3} \cdot (2200\text{-}998) \cdot 9{,}81] = 84{,}0;$$

čia $\mu = 1{,}005 \cdot 10^{-3}$ Pa·s ir ρ_t = 998 kg/m^3 – 20 °C temperatūros vandens dinaminė klampa (I pav.) ir tankis (III lentelė); ρ_a = 1350 kg/m^3 – anglies tankis (I lentelė); ρ_s = 2200 kg/m^3 – skalūno tankis.

Iš 2.1 pav. grafiko nustatomos atitinkamos *Ar* kriterijaus vertės:

- pailgų anglies dalelių *Ar* = 90000, pagal jį iš (2.3) lygties apskaičiuojamas dalelių ekvivalentinis skersmuo:

$$d_{ekv} = \sqrt[3]{9 \cdot 10^4 \cdot 1{,}005 \cdot 10^{-3} / [(1350 - 998) \cdot 998 \cdot 9{,}81]} = 2{,}82 \cdot 10^{-3} \text{ m};$$

- plokščių skalūno dalelių *Ar* = 70000 ir pagal jį:

$$d_{ekv} = \sqrt[3]{7 \cdot 10^4 \cdot 1{,}005 \cdot 10^{-3} / [(2200 - 998) \cdot 998 \cdot 9{,}81]} = 1{,}81 \cdot 10^{-3} \text{ m}.$$

2.4. Pvz. Koks turi būti atstumas tarp dulkių kameros (2.2 pav.) horizontalių lentynų, kad jose iš degimo dujų srauto spėtų nusėsti $8{,}0 \cdot 10^{-3}$ m skersmens suodžių dalelės? Dujų debitas normaliomis sąlygomis 0,6 m^3/s, dinaminė klampa 0,034 Pa·s, tankis 0,5 kg/m^3. Suodžių tankis 4000 kg/m^3. Dulkių kameros darbinio tūrio ilgis 4,1 m, plotis 2,8 m, bendras aukštis 4,2 m.

S p r e n d i m a s. Dulkėto oro debitas, esant dujų 427 °C temperatūrai:

$$V_s = 0{,}60 \cdot (273 + 427)/273 = 1{,}54 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Dujų srauto lygiagrečiai lentynoms greitis:

$$w_1 = 1{,}54/(2{,}8 \cdot 4{,}2) = 0{,}131 \text{ m/s}.$$

Dujų judėjimo kameroje trukmė:

$$\bar{\tau} = L/w_1 = 4{,}1/0{,}131 = 31{,}3 \text{ s}.$$

Vienodo dydžio rutulio formos dalelių teorinis nusodinimo greitis apskaičiuojamas pagal (2.1) Stokso lygtį:

$$w_n = (4000 - 0{,}50) \cdot 9{,}81 \cdot (8 \cdot 10^6)^2 / (18 \cdot 0{,}034 \cdot 10^{-3}) = 0{,}0041 \text{ m/s}.$$

Norėdami patikrinti (2.1) lygties tinkamumą, apskaičiuojame *Re*:

$$Re_n = 0{,}0041 \cdot 8 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}50 / (0{,}034 \cdot 10^{-3}) = 0{,}000482 < 0{,}2 .$$

Dulkių kamerose nusodinimo tikrasis greitis imamas du kartus mažesnis negu teorinis:

$$w_n' = 0{,}0041/2 = 0{,}00205 \text{ m/s}.$$

Atstumas tarp horizontalių lentynų apskaičiuojamas kaip kelias, kurį nueina nusodinama dalelė būdama darbo kameroje:

$$H = w_n' \cdot \bar{\tau} = 0{,}00205 \cdot 31{,}3 = 0{,}0642 \text{ m}.$$

2.5. Pvz. Apskaičiuoti periodinio veikimo nusodintuvo (2.3 pav.) skersmenį, kuriame, esant 15 °C temperatūrai, vandenyje nusodinamos mažesnės už 0,03 mm kreidos dalelės. Nusodintuvo našumas pagal tiekiamą suspensiją – 80 t/h. Suspensijoje yra 8 % kietos fazės. Gaunamų nuosėdų drėgmė 70 %.

S p r e n d i m a s. Teorinis dalelių nusodinimo greitis laminarinio nusodinimo atveju apskaičiuojamas pagal (2.1) lygtį:

$$w_n = (2200 - 1000) \cdot 9{,}81 \cdot (0{,}035 \cdot 10^{-3})^2 / (18 \cdot 1{,}14 \cdot 10^{-3}) = 0{,}000703 \text{ m/s};$$

čia $\mu = 1{,}14 \cdot 10^{-3}$ Pa·s ir $\rho = 1000$ kg/m^3 – 15 °C temperatūros vandens dinaminė klampa (I pav.) ir tankis (III lentelė); $\rho_k = 2200$ kg/m^3 – kreidos tankis (I lentelė).

Re vertė:

$$Re_n = 0{,}00070 \cdot 0{,}035 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 / (1{,}14 \cdot 10^{-3}) = 0{,}0216 < 0{,}2 .$$

Tikrasis dalelių nusodinimo greitis realiame aparate:

$$w_n' = 0{,}000703/2 = 0{,}000351 \text{ m/s}.$$

Nusodintuvo plotas apskaičiuojamas pagal (2.5) lygtį:

$$S_n = (80 \cdot 10^3/3600) \cdot (1 - 8/30)/(1000 \cdot 0{,}00035) = 46{,}4 \text{ m}^2.$$

Nusodintuvo skersmuo:

$$D = \sqrt{S_n /(\pi/4)} = \sqrt{46{,}4/0{,}785} = 7{,}69 \text{ m}.$$

2.6. Pvz. Apskaičiuoti nusodintuvo (2.3 pav.) aukštį, jei darbo zonoje suspensija sutirštinama per 16 val. Dalelių tankis 2600 kg/m^3. Vidutinis praskiedimas sutankinimo zonoje (kietos medžiagos K ir skystos fazės Sk kiekių santykis) $K : Sk = 1 : 1{,}5$. 10 m skersmens nusodintuvo našumas – 23 tonos kietos fazės per parą.

S p r e n d i m a s. Suspensijos padavimo zonos aukštis yra (0,45–0,75) m ribose, t. y. imame, kad $h_1 = 0{,}6$ m.

Suspensijos tankis sutirštinimo zonoje apskaičiuojamas pagal (2.11) lygtį:

$$\rho_s = \frac{1{,}5+1}{1/2600+1{,}5/1000} = 1330 \text{ kg/m}^3.$$

Kietos fazės dalis suspensijoje:

$$x = 1/(1+1{,}5) = 0{,}4 \text{ kg}_{\text{kietos fazės}}/\text{kg}_{\text{suspensijos}}.$$

Todėl sutirštintos suspensijos 1 m^3 kietos fazės bus:

$$T = \rho_s \cdot x = 1330 \cdot 0{,}40 = 531 \text{ kg}.$$

Per parą ant 1 m^2 nusodintuvo skerspjūvio nusodinama kietos fazės:

$$23/(0{,}785 \cdot 10^2) = 0{,}293 \text{ t/(m}^2\text{·parą)}.$$

Per 16 valandų per 1 m^2 prateka:

$$0{,}293 \cdot (16/24) = 0{,}195 \text{ t kietos fazės}.$$

Kadangi sutirštinimo zonoje 1 m^3 suspensijos yra 0,531 tonos kietos fazės, tai šios zonos aukštis:

$$h_2 = 0{,}195/0{,}531 = 0{,}368 \text{ m}.$$

Apatinėje zonoje sukasi maišyklė. Zonos aukštis priklauso nuo sparnelių aukščio ir jų polinkio kampo. Praktiškai vienam nusodintuvo spindulio metrui imamas 0,15 m aukštis:

$$h_3 = 0{,}15 \cdot (10/2) = 0{,}75 \text{ mm}.$$

Bendras nusodintuvo aukštis:

$$H = h_1 + h_2 + h_3 = 0{,}6 + 0{,}368 + 0{,}75 = 1{,}72 \text{ m}.$$

2.7. Pvz. Apskaičiuoti, per kurį laiką iš suspensijos per 2,5 m^2 filtruojančios pertvaros paviršiaus surinksime 30 litrų filtrato. Pirminių bandymų metu per tokią pat filtruojančią pertvarą ir su ta pačia suspensija, esant tam pačiam slėgių skirtumui, filtruojant per 1,2 dm^2 bandomojo filtro paviršiaus, buvo surinkta 0,025 *l* filtrato per 2,3 min. ir 0,08 *l* per 15 min. nuo filtravimo pradžios.

S p r e n d i m a s. Panaudoję bandymo rezultatus, pagal (2.7) lygtį apskaičiuojamos filtravimo konstantos K ir C:

$$(0{,}025\cdot10^{-3}/1{,}2\cdot10^{-2})^2+2\cdot(0{,}025\cdot10^{-3}/1{,}2\cdot10^{-2})\cdot C=K\cdot(2{,}3\cdot60);$$

$$0{,}08\cdot10^{-3}/1{,}2\cdot10^{-2})^2+2\cdot(0{,}080\cdot10^{-3}/1{,}2\cdot10^{-2})\cdot C=K\cdot(15\cdot60).$$

Iš jų: $K=5{,}52\cdot10^{-8}$ m^2/s ir $C=0{,}785\cdot10^{-3}$ m.
Filtravimo trukmė:

$$(30\cdot10^{-3}/2{,}5)^2+2(30\cdot10^{-3}/2{,}5)0{,}785\cdot10^{-3}=5{,}52\cdot10^{-8}\tau.$$

Iš čia: $\tau=3{,}16\cdot10^3 s=52{,}7$ min.

2.8. Pvz. Pagal 2.7. Pvz. sąlygą apskaičiuoti nuosėdų plovimo 2,5 l/m^2 skysčiu trukmę, kai filtrato ir plovimo skysčio dinaminė klampa ir tankis vienodi, o plaunama ir filtruojama toje pačioje linijoje.

S p r e n d i m a s. Nuosėdų plovimo greitis atitinka filtravimo per didžiausią nuosėdų sluoksnį, t. y. filtravimo pabaigos greitį. Norint apskaičiuoti plovimo greitį, 2.7. Pvz. apskaičiuotos K ir C konstantų vertės panaudojamos (2.6) lygtyje:

$$\left(\frac{dV}{d\tau}\right)_{pr}=\frac{5{,}52\cdot10^{-8}}{2\cdot[(30\cdot10^{-3}/2{,}5)+0{,}785\cdot10^{-3}]}=0{,}216\cdot10^{-5}\ \text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{s}).$$

Apskaičiuojama plovimo trukmė:

$$\tau_{pr}=V_{pr}/(dV/d\tau)_{pr}=2{,}5\cdot10^{-3}/0{,}216\cdot10^{-5}=1{,}16\cdot10^3\ s=19{,}3\ \text{min}.$$

2.9. Pvz. Apskaičiuoti rėminio filtpreso darbinės dalies matmenis, jei juo per 3 val. laboratorijoje galima gauti 6 m^3 filtrato. Analogiškomis sąlygomis filtruojant tą pačią suspensiją, gautos tokios filtravimo konstantos:
$K=5{,}75\cdot10^{-7}$ m^2/s ir $C=1{,}45\cdot10^{-3}$ m.

S p r e n d i m a s. Filtrato kiekis, gautas per filtruojančios pertvaros paviršiaus 1 m^2, apskaičiuojamas pagal (2.7) lygtį:

$$V^2+2\cdot1{,}45\cdot10^{-3}\cdot V=5{,}75\cdot10^{-7}\cdot3\cdot3600.$$

Apskaičiavus gauname: $V=0{,}0773$ m^3/m^2.
Norint per 3 valandas gauti 6 m^3 filtrato, filtravimo paviršiaus plotas:
S = 6,0/0,0773 = 77,5 m^2.

2.10. Pvz. Nuolatinio veikimo būgniniu vakuumfiltru reikia filtruoti $2{,}36\cdot10^{-3}$ m^3/s suspensijos, turinčios 17,6 % kietos fazės. Suspensijos tankis 1120 kg/m^3. Gaunamų nuosėdų drėgmė 34 %, kai vakuumas būgno viduje –

600 mm Hg. Vykdant analogišką procesą laboratorinėmis sąlygomis ir esant 510 mm Hg vakuumui, buvo gautos tokios filtravimo konstantos: $K = 11{,}2 \cdot 10^{-6}$ m^2/s ir $C = 6{,}0 \cdot 10^{-3}$ m^3/m^2, o nuosėdų 34 % drėgmė pasiekta per 32 s. Apskaičiuoti reikalingą filtravimo paviršiaus plotą ir būgno sukimosi dažnį.

S p r e n d i m a s. Filtravimo konstantą K apytiksliai galime apskaičiuoti priimant, kad ji tomis pačiomis sąlygomis proporcinga slėgių skirtumui abipus filtruojančios pertvaros:

$$K / 11{,}2 \cdot 10^{-6} = 600 / 510 .$$

Iš čia $K = 13{,}1 \cdot 10^{-6}$ m^2/s.

Per 1 m^2 filtruojančios pertvaros per 32 s pratekėjęs filtrato kiekis apskaičiuojamas pagal (2.7) lygtį:

$$V = -6{,}0 \cdot 10^{-3} + \sqrt{(6{,}0 \cdot 10^{-3})^2 + 13{,}1 \cdot 10^{-6} \cdot 32} = 15{,}3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^2.$$

Filtravimo greitis:

$$w_f = 15{,}3 \cdot 10^{-3} / 32 = 0{,}479 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s}).$$

Pasirinktas našumas pagal suspensiją perskaičiuojamas į našumą pagal filtratą. Dėl to apytiksliai apskaičiuojamas drėgnų ir sausų nuosėdų masės santykis filtravimo pabaigoje

$$m = 1/(1 - 0{,}34) = 1{,}52 .$$

Kai kietos fazės masės dalis pradinėje suspensijoje $x = 0{,}176$, tada masės debitas:

$$G_s = V_s \rho_{susp} = 2{,}36 \cdot 10^{-3} \cdot 1120 = 2{,}64 \text{ kg/s}.$$

Drėgnų nuosėdų masė:

$$G_n = G_s \cdot x \cdot m = 2{,}64 \cdot 0{,}176 \cdot 1{,}52 = 0{,}706 \text{ kg/s}.$$

Filtrato masė:

$$G_f = G_s - G_n = 2{,}64 - 0{,}706 = 1{,}94 \text{ kg/s}.$$

Kai filtrato tankis $\rho_f = 1000$ kg/m^3, jo tūrio debitas:

$$V_f = G_f / \rho_f = 1{,}94/1000 = 1{,}94 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}.$$

Būtinas filtravimo paviršiaus plotas:

$$S_f = V_f / v_f = 1{,}94 \cdot 10^{-3} / 0{,}479 \cdot 10^{-3} = 4{,}05 \text{ m}^2.$$

Būgniniuose vakuumfiltruose filtravimo paviršiaus dalis, panardinta į suspensiją, paprastai sudaro apie 35 % nuo viso būgno paviršiaus ploto. Todėl filtravimo paviršiaus plotas turi būti:

$$S = S_f / 0{,}35 = 4{,}05 / 0{,}35 = 11{,}6 \text{ m}^2.$$

Būgno sukimosi dažnis, leidžiantis pasiekti pasirinktą filtravimo trukmę:

$$n = 35/32 = 0{,}0109\, s^{-1} = 0{,}656 \text{ min}^{-1}.$$

2.11. Pvz. Apskaičiuoti nuosėdų plovimo nuo druskų trukmę, jei leistina druskos koncentracija vandenyje po plovimo 5,0 kg/m^3. Plovimo švariu vandeniu intensyvumas $0{,}0917 \cdot 10^{-3}$ m/s. Plaunamų nuosėdų sluoksnio storis 35 mm, plovimo konstanta K_p = 0,520, druskos masės koncentracija vandenyje po plovimo proceso pradžioje 143 kg/m^3.

S p r e n d i m a s. Plovimo trukmė apskaičiuojama pagal (2.8) lygtį:

$$\tau = \frac{\delta_{sl}}{K_p \cdot \omega} \cdot ln \frac{c_{dr.n.}}{c_{dr.v.}} = \frac{0{,}035}{0{,}520 \cdot 0{,}0917 \cdot 10^{-3}} ln(143/5) = 2460 \text{ s}.$$

2.12. Pvz. Apskaičiuoti ciklono skersmenį, kad jame nusėstų 80 μm skersmens dalelės iš 2000 kg/h oro srauto, esant 100 °C temperatūrai ir atmosferiniam slėgiui.

S p r e n d i m a s. Sąlyginis dujų greitis cilindrinėje ciklono dalyje apskaičiuojamas pagal (2.14) lygtį:

$$w_c = \sqrt{2 \cdot (\Delta p / \rho) / \xi_o} = \sqrt{2 \cdot 740 / 160} = 3{,}04 \text{ m/s};$$

čia $\Delta p/\rho$ = 740 m^2/s^2 ir ξ_0 = 160 ciklono charakteristikos.

Oro tankis, esant 100 °C temperatūrai ir atmosferiniam slėgiui:

$$\rho = (29/22{,}4) \cdot 273/(273+100) = 0{,}948 \text{ kg/m}^3.$$

Ciklono skersmenį apskaičiuojame pagal (2.13) lygtį:

$$D = \sqrt{(2000/3600/0{,}948)/(0{,}785 \cdot 3{,}04)} = 0{,}496 \text{ m}.$$

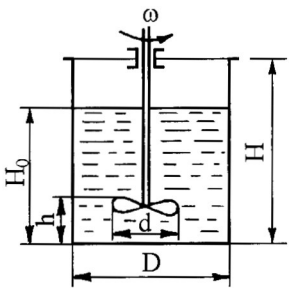
Imame, kad ciklono skersmuo D = 0,5 m.
Padidėjus skersmeniui, sąlyginis oro greitis ciklone

$$w_c = 3{,}04 \cdot (0{,}496/0{,}5)^2 = 2{,}99 \text{ m/s},$$

o slėgių skirtumas

$$\Delta p = 160 \cdot 0{,}948 \cdot 2{,}99^2/2 = 679 \text{ Pa}.$$

2.13. Pvz. Cilindrinės formos aparate, kurio skersmuo 1200 mm, maišomas skysčių mišinys, kurio tankis 1600 kg/m^3 ir dinaminė klampa $20 \cdot 10^{-3}$ Pa·s (2.8 pav.). Maišyklės sukimosi dažnis 3,5 s^{-1}. Apskaičiuoti, kokio galingumo turi būti elektros variklis.



2.8 pav. Maišymo įrenginys cilindriniame aparate

S p r e n d i m a s. Priimame, kad maišyklės skersmuo lygus 1/3 aparato skersmens, jei aparatas neturi skersinių pertvarų:

$$d = D/3 = 1{,}200/3 = 0{,}400 \text{ m}.$$

Apskaičiuojama Reinoldso kriterijaus vertė:

$$Re_c = 1600 \cdot 3{,}5 \cdot 0{,}400^2 / (20 \cdot 10^{-3}) = 44800.$$

Gauta vertė $Re_c > 60$ atitinka maišyklės darbo turbulentinį režimą.

Žinynuose parenkama galingumo kriterijaus vertė: $Eu_m = 0{,}27$.

Apskaičiuojame, kokio galingumo turi būti maišyklė, kad ji dirbtų nustatytais parametrais:

$$N = Eu_m \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d^5 = 0{,}27 \cdot 1600 \cdot 3{,}5^3 \cdot 0{,}400^5 = 190 \text{ W}.$$

Paleidimo metu reikalingas galingumas paprastai yra (2–3) kartus didesnis už darbinio režimo galingumą:

$$N_{pal} = 2{,}5 \cdot 190 = 475 \text{ W}.$$

Darbinis elektros variklio galingumas kartu su mechanine pavara pasižymi naudingumo koeficientu $\eta = 0{,}95$, o įvertinus 20 % atsargos koeficientą:

$$N_d = 475 \cdot 1{,}20 / 0{,}95 = 600 \text{ W}.$$

2.14. Pvz. 1630 mm skersmens cilindriniame inde su vidinėmis vertikaliomis briaunomis maišikliu su šešiomis mentėmis intensyviai maišoma klampi 1200 kg/m^3 tankio masė. Maišiklis, besisukdamas 240 min^{-1} dažniu, naudoja 16,5 kW galingumą. Apskaičiuoti maišiklio skersmenį.

S p r e n d i m a s. Intensyviam maišymui reikia turbulentinio maišiklio judėjimo skystyje. Tokio režimo galios kriterijus $Eu_m = 6{,}9$ (imant, kad $D/d = 3$).

Nustatytam Eu_m santykiui apskaičiuojamas maišiklio skersmuo:

$$d = \sqrt[5]{N / (Eu_m \cdot \rho \cdot n^3)} = \sqrt[5]{16{,}5 \cdot 10^3 / (6{,}9 \cdot 1200 (240/60)^3} = 0{,}500 \text{ m}.$$

Tuomet skersmenų santykis:

$$D/d = 1630/500 = 3{,}26$$ – ši vertė labai artima aukščiau priimtai vertei.

2.3. Kontroliniai uždaviniai

2.1. Apskaičiuoti rutulio formos kvarco dalelių nusodinimo greitį: a) 15 °C temperatūros vandenyje; b) ore, esant 15 °C ir 500 °C temperatūroms. Dalelių tankis 2600 kg/m^3, skersmuo 0,1 mm.

2.2. Rutulio formos švino ir kvarco dalelės yra nusodinamos vienodu greičiu ore ir vandenyje. Švino tankis 7800 kg/m^3, kvarco – 2600 kg/m^3. Apskaičiuoti tokių nusėdančių dalelių skersmenų santykį, jei nusodinimas yra laminarinio pobūdžio.

2.3. Apskaičiuoti 60 °C temperatūros oro greitį vertikalioje vamzdinėje džiovykloje, jei iš jos išmetamos 3 mm skersmens ir 200 kg/m^3 tankio dalelės.

2.4. Koks turi būti oro srauto greitis, kad mažesnės kaip 1 mm dalelės būtų atskirtos nuo stambesnių? Oro temperatūra 20 °C, dalelių tankis 3230 kg/m^3.

2.5. Apskaičiuoti atstumą tarp dulkių kameros lentynų (2.2 pav.), kad jose suspėtų nusėsti didesnio kaip 15 μm skersmens dulkės. Kitos sąlygos tokios pat kaip 2.4. Pvz.

2.6. Apskaičiuoti 3700 kg/m^3 tankio dulkių dalelių dydį, jei jos nusodinamos 4,5 m ilgio, 1,71 m pločio, 4,0 m aukščio dulkių kameroje. Atstumas tarp lentynų 100 mm. Per dulkių kamerą standartinėmis sąlygomis paduodama 2000 m^3/h užteršto oro, kurio dinaminė klampa $0{,}03 \cdot 10^{-3}$ Pa·s, temperatūra 400 °C.

2.7. Apskaičiuoti nuolatinio veikimo nusodintuvo (2.3 pav.) skersmenį, jei jame iš 35 °C temperatūros suspensijos vandenyje nusodinamos kreidos dalelės. Kitos sąlygos tokios pat kaip 2.5. Pvz.

2.8. Kaip pasikeis nusodintuvo našumas, jei skaidrinamą suspensiją pašildysime nuo 15 °C iki 50 °C? Abiem atvejais nusodinimo vandenyje pobūdis laminarinis.

2.9. Apskaičiuoti suspensijos vandenyje tankį, jei joje yra 10 % (masės) kietos fazės, kurios tankis 3000 kg/m^3.

2.10. Apskaičiuoti pailgų anglies ir plokščių skalūno dalelių nusodinimo vandenyje greitį, jei abiejų dalelių ekvivalentiniai skersmenys 2,0 mm. Vandens temperatūra 25 °C, anglies ir skalūno tankis atitinkamai 1400 kg/m^3 ir 2200 kg/m^3.

2.11. Apskaičiuoti kampuotų švino dalelių ekvivalentinį skersmenį, jei jų nusodinimo 15 °C temperatūros vandenyje greitis 0,05 m/s, dalelių tankis 7500 kg/m^3.

2.12. Apskaičiuoti ant filtruojančios pertvaros surinktų nuosėdų masę. Nuosėdų santykinis drėgnis 25 %. Filtruojama 10 m^3 1120 kg/m^3 tankio suspensija, kurioje kietos fazės yra 20 %.

2.13. Apskaičiuoti nuosėdų masę (skaičiuojamą pagal sausą medžiagą), jei, filtruojant 20 % kietos fazės turinčią suspensiją, gauta 15 m^3 filtrato.

2.14. Bandomuoju filtru, kurio darbinis plotas $1{,}0 \cdot 10^{-2}$ m^2, per 10 min. nuo filtravimo pradžios buvo surinkta 0,11 *l* filtrato, o per 45 min. – 0,25 *l*. Apskaičiuoti trukmę, kurios prireiks, filtruojant tą pačią suspensiją, gauti 65 *l* filtrato tomis pačiomis sąlygomis, tik 4,2 m^2 filtruojančio paviršiaus ploto pramoniniu filtru.

2.15. Apskaičiuoti nuosėdų plovimo trukmę 4,0 l/m^2 plovimo skysčiu, kai bandymais buvo gautos tokios konstantų vertės: $K = 2{,}62 \cdot 10^{-7}$ m^2/s ir $C = 1{,}64 \cdot 10^{-3}$ m^3/m^2. Filtravimui pasibaigus buvo surinkta 15,5 *l* filtrato nuo 1 m^2 filtruojančios pertvaros paviršiaus ploto. Plovimo skysčio savybės ir plovimo sąlygos yra identiškos filtrato savybėms ir filtravimo sąlygoms.

2.16. Apskaičiuoti kokio paviršiaus ploto turi būti filtpresas (2.4 pav.), kad per 2,5 h gautume 5 m^3 filtrato. Filtravimo konstantų vertės: $K = 7{,}1 \cdot 10^{-7}$ m^2/s ir $C = 1{,}2 \cdot 10^{-3}$ m^3/m^2.

2.17. Būgniniu vakuumfiltru (2.4 pav.) filtruojama $3{,}0 \cdot 10^{-3}$ m^3/s suspensijos, kurios tankis 1200 kg/m^3, o kietos fazės tūris sudaro 20 % nuo suspensijos tūrio. Bandymais nustatytos filtravimo konstantos: $K = 1{,}03 \cdot 10^{-5}$ m^2/s ir $C = 5{,}4 \cdot 10^{-3}$ m^3/m^2. Apskaičiuoti pramoninio filtro būgno filtravimo paviršiaus plotą ir sukimosi dažnį, kad per 40 s nuosėdų santykinis drėgnis sumažėtų iki 30 %. Būgninio vakuumfiltro aktyvus filtravimo paviršius sudaro 35 % viso būgno paviršiaus.

2.18. Apskaičiuoti nuosėdų sluoksnio plovimo švariu vandeniu trukmę ir sunaudojamą vandens kiekį, jei išplaunamo iš nuosėdų kieto komponento masės koncentracija turi būti $3{,}5 \cdot 10^{-3}$ kg/l, o prieš filtravimą suspensijos koncentracija 120 kg/m^3. Plovimo intensyvumas $0{,}11 \cdot 10^{-3}$ $m^3/(m^2 \cdot s)$, plovimo konstanta $K_p = 0{,}61$, nuosėdų sluoksnio storis 40 mm, filtruojančios pertvaros plotas 4,8 m^2.

2.19. Apskaičiuoti periodinio veikimo centrifugų skaičių, jei reikia filtruoti 50 t per parą 1800 kg/m^3 tankio suspensijos, kurioje yra 40 % kietos fazės. Centrifugos būgno $D = 1{,}5$ m ir $H = 0{,}5$ m, skystos fazės tankis 1100 kg/m^3, vienos operacijos trukmė 25 min., ciklų skaičius per parą 20, būgno užpildymo koeficientas 0,5.

2.20. Apskaičiuoti centrifugos našumą, kai joje nusodinama 2 μm dydžio kreidos dalelės iš 40 °C temperatūros suspensijos. Būgno ilgis 700 mm, bortelio skersmuo 1300 mm, sukimosi dažnis 735 min^{-1}, naudingumo koeficientas 0,45.

2.21. Apskaičiuoti nusodinančios centrifugos našumą, kai joje 2 μm dydžio gipso dalelės nusodinamos vandenyje iš 50 °C temperatūros suspensijos. Centri-

fugos būgno išpylimo cilindro skersmuo 480 mm, nusodinimo zonos ilgis 350 mm, būgno sukimosi dažnis 1400 min^{-1}.

2.22. Kokio dydžio daleles nusodins centrifuga, kai joje iš 35 °C temperatūros suspensijos vandenyje atskiriamas kaolinas? Centrifugos būgno išpylimo cilindro skersmuo 180 mm, jo ilgis 164 mm, sukimosi dažnis 1600 min^{-1}, našumas 3,0 m^3/h.

2.23. 18,0 Pa·s klampos ir 930 kg/m^3 tankio tepalas užpildo 3/4 indo, kurio skersmuo 900 mm ir aukštis 1100 mm. Apskaičiuoti, kokio reikia elektros variklio galingumo, kad sraigtinis maišiklis maišytų tepalą 180 min^{-1} dažniu.

2.24. Apskaičiuoti, kokiu dažniu suksis 0,5 m skersmens inkarinis maišiklis 60 °C temperatūros vandens tirpale, jei elektros varikliui reikalinga galia 0,8 kW, o tirpalo fizikinės savybės tokios pat kaip vandens.

2.25. Inkarinis maišiklis, kurios skersmuo $d_1 = D/3$, pakeistas mažesnio skersmens $d_2 = D/4$ maišikliu. Čia D – cilindrinio indo, kuriame maišomas skystis, skersmuo. Koks bus mažesnės maišyklės maišiklio sukimosi dažnis, jei elektros varikliui reikalingas tas pats galingumas, o maišiklio aptekėjimo skysčiu pobūdis abiem atvejais yra laminarinis?

2.26. Koks turi būti sraigtinio maišiklio skersmuo, kad galėtų maišyti 1,6 Pa·s dinaminės klampos ir 1200 kg/m^3 tankio gliceriną 1,7 m skersmens inde 500 min^{-1} dažniu, kai variklio galia 17 kW?

3 dalis. ŠILUMOS MAINAI

3.1. Pagrindiniai dėsningumai ir skaičiavimų lygtys

1. Bendrosios sąvokos

Yra žinomi trys skirtingi šilumos plitimo būdai: 1) *laidumas (kondukcija)*, 2) *konvekcija*, 3) *spinduliavimas (radiacija)*.

Šilumos mainų proceso varos jėga yra temperatūrų skirtumas tarp dviejų medžiagos taškų. Šiluma visada iš aukštesnės temperatūros medžiagos taško pereina į žemesnės temperatūros tašką. Šiam perėjimui besipriešinanti jėga vadinama *šiluminė varža.*

Termodinamikoje savitieji dydžiai (nustatyti 1 kg masei) žymimi mažosiomis raidėmis (pvz. vidinė energija u, entalpija h, entropija s, suteiktas arba atiduotas šilumos kiekis q), o bet kokią masę M atitinkantys dydžiai didžiosiomis raidėmis: U, H, S, Q ir t.t.

Kūno vidinė energija susideda iš vidinės kinetinės ir potencinės energijos. Kūno, kurio masė M, kg, vidinė energija yra: $U = U_k + U_p$, J, o savitoji (masės vieneto kg) vidinė energija $u = u_k + u_p$, J/kg.

Savitoji entalpija yra 1 kg dujų vidinės energijos ir potencinės slėgio p energijos suma:

$$h = u + p \cdot v \,. \tag{3.1}$$

Entropija yra šilumos pokyčio dq santykis su absoliutine temperatūra T, kuriai esant įvyksta šis pokytis. Ji apskaičiuojama pagal lygtį:

$$ds = \frac{dq}{T} = c_v \cdot \frac{dT}{T} + R \cdot \frac{dv}{v}\,; \tag{3.2}$$

čia c_v – izochorinė savitoji šiluma, J/(kg·K); T – absoliutinė temperatūra, K; v – savitasis tūris, m^3/kg; R – dujų konstanta, J/(kg·K).

Šilumos talpumas yra medžiagos savybė kaitinant sukaupti šilumą, o aušinant ją atiduoti. Medžiagos šilumos talpumą apibūdinantis dydis yra jos *savitoji šiluma c*.

Savitoji šiluma – tai šilumos kiekis, J, kurio reikia medžiagos vienetinio kiekio (kg, m^3, kmol) temperatūrai pakelti vienu laipsniu. Kylant temperatūrai, savitosios šilumos c vertė gana sparčiai didėja.

2. Šilumos perdavimas laidumu. Šilumos laidumo koeficientas.

Šilumos plitimas laidumu nusakomas Furje laidumo dėsniu:

$$q = -\lambda \cdot gradt\,; \tag{3.3}$$

čia q – šilumos srauto tankis, W/m^2; λ – šilumos laidumo koeficientas, W/(m·K); *gradt* – temperatūros gradientas, K/m.

Šilumos laidumo koeficiento priklausomybę nuo temperatūros galima išreikšti tokia lygtimi:

$$\lambda_t = \lambda_o \cdot (1 \pm b \cdot t); \qquad (3.4)$$

čia λ_o – šilumos laidumo koeficiento vertė, kai medžiagos temperatūra t = 0 °C; b – eksperimentiškai nustatyta konstanta (parenkama lentelėse); t – medžiagos temperatūra, °C.

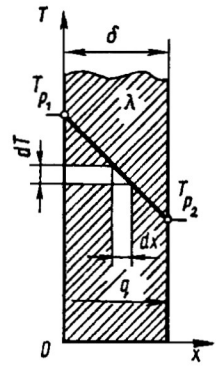
Norint teisingai įvertinti per tam tikros medžiagos sluoksnį pratekančio šilumos srauto tankio q vertę, kai šį sluoksnį ribojančių paviršių temperatūros t_1 ir t_2, būtina nustatyti *vidutinę* šio sluoksnio *šilumos laidumo koeficiento* vertę, t. y.:

$$\lambda_m = \lambda_0 \cdot (1 \pm b \cdot t_m); \qquad (3.5)$$

čia $t_m = (t_1 + t_2)/2$ – vidutinė sluoksnio temperatūra.

Esant pastoviam šilumos srautui per vertikalią sienelę (3.1 pav.), kai $t_{p1} > t_{p2}$ ir temperatūros laukas yra vienmatis, plokščios sienelės temperatūros lauko kitimas užrašomas:

$$t = t_{p_1} - \frac{t_{p_1} - t_{p_2}}{\delta} \cdot x. \qquad (3.6)$$



3.1 pav. Šilumos pernašos per plokščią sienelė schema

Panaudoję Furje dėsnio (3.3 lygtis) ir temperatūros gradiento išraiškas, *plokščios vienasluoksnės sienelės šilumos srauto tankio q,* W/m^2, *laidumo būdu* lygtis gali būti užrašyta taip:

$$q = -\lambda \cdot \frac{t_{p_2} - t_{p_1}}{\delta} = \frac{t_{p_1} - t_{p_2}}{\delta / \lambda}. \qquad (3.7)$$

Dydis δ/λ vadinamas *vienasluoksnės plokščios sienelės šilumine varža. Plokščios daugiasluoksnės sienelės šilumos srauto tankio laidumo būdu* lygtis:

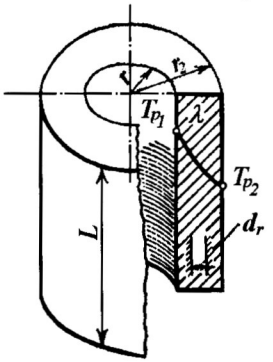
$$q = \frac{t_{p_1} - t_{p_{n+1}}}{\sum_{i=1}^{i=n} \delta_i / \lambda_i}. \qquad (3.8)$$

Temperatūros pokyčio lygtis *cilindrinei sienelei* (3.2 pav.) užrašoma taip:

$$t_{p_1} - t_{p_2} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot L} \cdot ln \frac{r_2}{r_1}. \qquad (3.9)$$

Šilumos srautas Q, W, plintantis laidumo būdu cilindrinėje sienelėje, apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$Q = \frac{\pi \cdot L \cdot (t_{p_1} - t_{p_2})}{\frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot ln \frac{d_2}{d_1}}. \qquad (3.10)$$



3.2 pav. Temperatūros kitimo cilindrinėje sienelėje schema

Jei cilindrinė sienelė sudaryta iš *n* sluoksnių, tai:

$$Q = \frac{\pi \cdot L \cdot (t_{p_1} - t_{p_{n+1}})}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}; \qquad (3.11)$$

čia d_i ir d_{i+1} – atskirų sluoksnių skersmenys, m, o vardiklis vadinamas *daugiasluoksnės cilindrinės sienelės šilumine varža.*

Per rutulio formos sienelę ($F = 4 \cdot \pi \cdot r^2$) laidumu plintantis šilumos srautas apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$Q = \frac{\pi \cdot (t_{p_1} - t_{p_2})}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot (\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1})} \qquad (3.12)$$

čia d_1 ir d_2 – tuščiavidurio rutulio vidinis ir išorinis skersmenys, m; t_{p1} ir t_{p2} – atitinkamų paviršių temperatūros, °C.

Skysčių šilumos laidumo koeficientas apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$\lambda_t = \lambda_{30} \cdot [1 - \chi \cdot (t - 30)]; \qquad (3.13)$$

čia λ_{30} – 30 °C temperatūros skysčių šilumos laidumo koeficientas apskaičiuojamas pagal lygtį $\lambda_{30} = A \cdot c \cdot \rho \cdot (\rho / M_\mu)^{1/3}$; A – koeficientas, įvertinantis skysčio asociacijos laipsnį; c – skysčio savitoji šiluma, J/(kg·K); ρ – tankis, kg/m^3; M_μ – skysčio kilomolio masė, kg/kmol. Asocijuotų skysčių (pvz., vandens) $A = 3{,}58 \cdot 10^{-8}$; neasocijuotų skysčių (pvz., benzeno) $A = 4{,}22 \cdot 10^{-8}$; χ – temperatūros įtakos koeficientas. Dažniausiai naudojamų skysčių χ vertės yra šios: anilino – 1,4; metanolio –1,2; chlorbenzeno – 1,5; acetono – 2,2; nitrobenzeno – 1,0; chloroformo – 1,8; benzeno – 1,8; propanolio – 1,4; etanolio – 1,4; heksano – 2,0; acto rūgšties – 1,2; etilacetato – 2,1.

Vandeninių tirpalų šilumos laidumo koeficiento vertę, esant temperatūrai *t*, galima apskaičiuoti:

$$\lambda_t = \lambda_{30} \cdot \lambda_{H_2O_t} / \lambda_{H_2O_{30}}. \qquad (3.14)$$

Dujų šilumos laidumo koeficientas, jei dujų absoliutiniai slėgiai nelabai dideli (iki kelių MPa), apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$\lambda = B \cdot \mu \cdot c_v; \qquad (3.15)$$

čia B – konstanta, apskaičiuojama $B = (9 \cdot k - 5)/4$ (vienatomių dujų $B = 2{,}5$; dviatomių dujų $B = 1{,}9$; triatomių dujų $B = 1{,}72$.), k – adiabatės rodiklis $k = c_p/c_v$; c_v – izochorinė savitoji šiluma, J/(kg·K); c_p – izobarinė savitoji šiluma, J/(kg·K); μ – dujų dinaminė klampa, Pa·s (II pav.).

3. Šilumos perdavimas spinduliavimo būdu.

Šiluminio spinduliavimo nuo įkaitusios kietos arba skystos medžiagos (pilko kūno) paviršiaus srauto tankis nusakomas Stefano-Bolcmano dėsniu:

$$q_{sp} = 5{,}67 \cdot 10^{-8} \varepsilon \cdot T^4. \qquad (3.16)$$

čia $5{,}67 \cdot 10^{-8}$ – Bolcmano konstanta, W/(m^2·K^4); ε – pilko kūno paviršiaus juodumo laipsnis; T – absoliutinė temperatūra, K.

Šilumos atidavimas šiluminiu spinduliavimu nuo įkaitusio kieto kūno paviršiaus.

a) Šiluminio spinduliavimo būdu, perduodamo nuo vieno lygiagretaus pilko paviršiaus kitam, šilumos srauto tankis apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$q_{sp} = 5{,}67 \cdot \varepsilon_t \cdot \left[(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4 \right]; \qquad (3.17)$$

čia $\varepsilon_t = (1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1)^{-1}$ – tariamasis begalinių lygiagrečių plokščių pilkų paviršių sistemos juodumo laipsnis; ε_1 ir ε_2 – paviršių juodumo laipsniai.

b) Šilumos srauto, perduodamo bendraašio vidinio įkaitusio išorinio cilindrinio paviršiaus F_1 į jį supantį tuščiavidurį išorinį cilindro vidinį paviršių F_2, dydis apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$Q_{sp} = 5{,}67 \cdot F_1 \cdot \frac{(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4}{1/\varepsilon_1 + (1/\varepsilon_2 - 1) \cdot F_1/F_2} \quad \text{W}. \qquad (3.18)$$

Bendras išorinių paviršių šilumos atidavimo koeficientas apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$\alpha_{iš} = \alpha_{sp} + \alpha_k = K_d \cdot \sqrt[4]{T_{iš} - T_a} + \\ + \frac{5{,}7 \cdot \varepsilon \cdot [(T_{iš}/100)^4 - (T_a/100)^4]}{T_{iš} - T_a} \quad \text{W/(m}^2\text{·K)}; \qquad (3.19)$$

čia K_d – šilumos srauto sklidimo kryptį įvertinantis daugiklis, $K_d = 3{,}3$ – horizontaliems paviršiams, atiduodantiems šilumą į viršų; $K_d = 2{,}6$ – vertikaliems sienų paviršiams šilumą atiduodantiems horizontalia kryptimi; $K_d = 1{,}6$ – horizontaliems paviršiams, atiduodantiems šilumą į apačią; $T_{iš}$ – išorinio paviršiaus temperatūra, K; T_a – aplinkos oro temperatūra, K; ε – medžiagos paviršiaus juodumo laipsnis.

4. Šilumos perdavimas konvekcija. Šilumos atidavimas.

Fluido masės vienetas turi tam tikrą entalpiją h, J/kg, todėl jam judant, kartu su mase pernešama ir energija (šiluma), dėl to ir susidaro *konvekcinis šilumos srautas*, kurio tankis q, W/m^2, apskaičiuojamas:

$$q = m \cdot h = \rho \cdot w \cdot c_p \cdot t \,. \tag{3.20}$$

Šilumos mainai tarp įrenginio paviršiaus ir jį aptekančio fluido srauto vadinami šilumos atidavimu. Šiuo atveju susidarančio šilumos srauto tankis išreiškiamas Niutono lygtimi:

$$q = \alpha \cdot \Delta t \,; \tag{3.21}$$

čia Δt – fluido ir paviršiaus temperatūrų skirtumas, °C (jei fluidas šiltesnis už paviršių, tai $\Delta t = t_f - t_p$, jei atvirkščiai, tai $\Delta t = t_p - t_f$; t_f ir t_p – fluido ir paviršiaus temperatūros, °C.

Proporcingumo koeficientas α, apibūdinantis šilumos atidavimo intensyvumą, vadinamas *šilumos atidavimo koeficientu.*

Šilumos atidavimo procesų panašumo kriterijai, jų fizikinės prasmės.

Remiantis šilumos atidavimo teoriniais ir eksperimentiniais tyrimais, sudaromos kriterijų lygtys, kurių bendroji išraiška yra tokia:

$$Nu = f\left(Re, Gr, Pr\right). \tag{3.22}$$

Apibūdinamuoju Nuselto kriterijumi (*Nu*) išreiškiamas ieškomas dydis – šilumos atidavimo koeficientas α. Nu parodo šilumos atidavimo intensyvumo padidėjimą dėl konvekcijos, palyginus su grynu fluido šilumos laidumu:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot \ell}{\lambda} = \frac{\alpha \cdot \Delta T}{\frac{\lambda}{\ell} \cdot \Delta T} \approx \frac{q_k + q_l}{q_l} \,; \tag{3.23}$$

čia l – būdingas aptekamo kūno paviršiaus matmuo, m, (tekant fluidui vamzdžiu – vamzdžio skersmuo, m; aptekant plokščią paviršių – paviršiaus ilgis L, m ir t. t.; Δt – paviršiaus ir fluido temperatūrų skirtumas, K; λ – fluido šilumos laidumo koeficientas, W/(m·K).

Reinoldso kriterijus charakterizuoja fluido *tekėjimo pobūdį* ir yra tekančio fluido inercijos ir trinties jėgų santykis:

$$Re = \frac{\rho \cdot w \cdot \ell}{\mu} = \frac{\rho \cdot w^2}{\mu \cdot (w/\ell)} \tag{3.24}$$

čia sandauga $\rho \cdot w^2 = (\rho \cdot w) \cdot w \approx m \cdot w$ yra proporcinga greičiu w tekančio fluido srauto inercijos jėgoms, o sandauga $\mu \cdot (w/\ell)$ – proporcinga trinties jėgoms.

Grashofo kriterijus įvertina *konvekcines fluido sroves*, susidarančias dėl fluido tankių skirtumo, nes sandauga $\beta \cdot g \cdot \rho \cdot l \cdot \Delta T$ yra proporcinga Archimedo jėgoms, sudarančioms gravitacinį slėgį; sandauga $\rho \cdot w^2$ proporcinga srauto inercijos jėgoms, o sandauga $\mu \cdot (w/l)$ proporcinga dinaminės trinties jėgoms:

$$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot \rho^2 \cdot \ell^3 \cdot \Delta t}{\mu^2} = \frac{(\beta \cdot g \cdot \rho \cdot \ell) \cdot (\rho \cdot w^2)}{(\mu \cdot \frac{w}{\ell})^2}. \qquad (3.25)$$

Prandtlio kriterijus išreiškia tekančio fluido *hidrodinaminio ir šiluminio pasienio sluoksnių storių santykį:*

$$Pr = \frac{Pe}{Re} = \frac{w \cdot \ell / a}{w \cdot \ell / \nu} = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda}; \qquad (3.26)$$

čia greičio pokytis hidrodinaminiame pasienio sluoksnyje yra proporcingas kinematinei klampai ν, o temperatūros pokytis šiluminiame pasienio sluoksnyje – proporcingas temperatūros laidumui $a = \lambda/(c_p \cdot \rho)$.

Peklė kriterijus $Pe = w \cdot l/a$ apibrėžia *šilumos srautų, pernešamų tekančio fluido sraute konvekcijos ir laidumo būdais, santykį.*

Galilėjaus kriterijus parodo *inercijos ir gravitacinio lauko Archimedo jėgos sandaugos santykį su vidinių trinties jėgų kvadratu*:

$$Ga = g^3/\nu^2 = g \cdot \rho^2/\mu^2. \qquad (3.27)$$

Frudo kriterijus $Fr = w^2/(g \cdot l)$ *parodo fluido sraute veikiančių inercijos ir sunkio jėgų santykį.*

5. Šilumos perdavimas per sienelę.

Šilumos perdavimo per sienelę lygtis, kai šilumos srautas Q, W, nuostovusis, užrašoma taip:

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t_m; \qquad (3.28)$$

čia K – šilumos perdavimo koeficientas, W/(m^2·K); F – šilumos perdavimo paviršiaus plotas, m^2; Δt_m – vidutinis temperatūrų skirtumas tarp šildančiojo ir šildomojo fluidų šilumokaityje, °C

Šilumos srauto tankis (lyginamoji šiluminė apkrova) q, W/m^2, apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$q = Q/F = K \cdot \Delta t_m. \qquad (3.29)$$

P*lokščios sluoksniuotos sienelės* šilumos perdavimo koeficientas K apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$K = (1/\alpha_1 + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \sum r_p + 1/\alpha_2)^{-1}; \qquad (3.30)$$

čia α_1 – šildančiojo fluido šilumos atidavimo sienelės paviršiui koeficientas, W/(m^{2}K); α_2 – sienelės paviršiaus šilumos atidavimo šildomajam fluidui koeficientas, W/(m^{2}K); $\sum(\delta_i / \lambda_i)$ – suminė visų sienelę sudarančių medžiagos sluoksnių šiluminė varža, (m^2·K)/W; δ_i – atskiro sienelės sluoksnio storis, m; λ_i – atskiro sienelės medžiagos sluoksnio šilumos laidumo koeficientas, W/(m·K); $\sum r_p$ – nuovirų, nuosėdų arba rūdžių sluoksnių suminė šiluminė varža, (m^2·K)/W.

Cilindrinių paviršių šilumos mainų paviršiaus plotas F_c, m^2, apskaičiuojamas:

$$F_c = \pi \cdot d_s \cdot n \cdot L; \qquad (3.31)$$

čia d_s – skaičiuojamasis vamzdžio skersmuo, m; $d_s = d_{iš}$, jei $\alpha_{iš} \gg \alpha_{vid}$; $\alpha_{iš}$, α_{vid} – šilumos atidavimo koeficientai iš išorinės ir vidinės vamzdžio pusių, W/(m^2·K); $d_s = 0{,}5 \cdot (d_{iš} + d)$, jei $\alpha_{iš} \le \alpha_{vid}$; $d_{iš}$ ir d – išorinis ir vidinis vamzdžio skersmenys, m; n – vamzdžių skaičius šilumokaityje; L – vamzdžio ilgis, m.

Plačiausiai naudojamų *vamzdinių korpusinių šilumokaičių* atveju pagrindinę šilumos perdavimo lygtį (3.28) galima užrašyti tokiu pavidalu:

$$Q = K_L \cdot n \cdot L \cdot \Delta t_m. \qquad (3.32)$$

čia K_L – linijinis šilumos perdavimo koeficientas, nustatytas vienam vamzdžio ilgio metrui, W/(m·K).

$$K_L = \pi(\frac{1}{\alpha_{vid} \cdot d} + \frac{r_{p,vid}}{d} + \frac{1}{2\lambda} ln \frac{d_{iš}}{d} + \frac{r_{p,iš}}{d_{iš}} + \frac{1}{\alpha_{iš} \cdot d_{iš}})^{-1}; \qquad (3.33)$$

čia $r_{p,vid}$ ir $r_{p,iš}$ – dangų (užterštumų) iš vidinės ir išorinės vamzdžio sienelės pusių šiluminės varžos, (m^2·K)/W.

6. Agentų vidutinio temperatūrų skirtumo Δt_{vid} skaičiavimas

Vidutinis temperatūrų skirtumas Δt_{vid} skaičiuojamas pagal tą pačią metodiką vienos ėjos šilumokaičiui, esant pasroviniam ir priešsroviniam tekėjimui. Schemiškai pasrovį ir priešsrovį fluidų judėjimą šilumokaityje pagal temperatūras galima atvaizduoti taip:

- pasrovis judėjimas

$t_{a,į} \rightarrow t_{a,i}$,

$t_{š,į} \rightarrow t_{š,i}$;

- priešsrovis judėjimas

$t_{a,į} \rightarrow t_{a,i}$,

$t_{š,i} \leftarrow t_{š,į}$.

Toliau apskaičiuojamas temperatūrų skirtumas šilumokaičio pradžioje Δt_1 ir gale Δt_2, pvz.: fluidams judant pasroviui:

$$\Delta t_1 = t_{a,i} - t_{š,i} \ , \tag{3.34}$$

$$\Delta t_2 = t_{a,i} - t_{š,i} \ . \tag{3.35}$$

Apskaičiavus temperatūrų skirtumus abiejuose šilumokaičio galuose, iš jų parenkamas didesnis ir priskiriamas Δt_{max}, o kitas – Δt_{min}. Patikrinama, ar tenkinama nelygybė:

$$\frac{\Delta t_{maks}}{\Delta t_{min}} \le 2{,}0 \ . \tag{3.36}$$

Jei ši nelygybė tenkinama, tai

$$\Delta t_{vid} = 0{,}5 \cdot \left(\Delta t_{max} + \Delta t_{min}\right) \ . \tag{3.37}$$

Jei nelygybė netenkinama, tai

$$\Delta t_{vid} = \frac{\Delta t_{maks} - \Delta t_{min}}{ln\left(\Delta t_{maks} / \Delta t_{min}\right)} \ . \tag{3.38}$$

7. Skaičiavimai pagal šilumos balanso lygtis

Skaičiuojant šilumokaičius, kuriuose šilumos mainuose dalyvaujančių fluidų agregatinė būklė nekinta, vadovaujamasi prielaida (šilumos balansu), kad fluidų į šilumokaitį įnešamų šilumos srautų suma lygi tų pačių fluidų iš šilumokaičio išnešamų šilumos srautų ir šilumos nuostolių į aplinką sumai.

Šildančiuoju fluidu, kai jo agregatinė būklė nekinta, įneštas (atiduotas) šilumos srautas arba šildomajam fluidui suteiktas šilumos srautas Q, W, apskaičiuojamas taip:

$$Q = G \cdot c \cdot \Delta t \ ; \tag{3.39}$$

čia G – atitinkamo fluido debitas, kg/s; c – fluido savitoji (specifinė) šiluma, J/(kg·K); Δt – temperatūrų, atitinkamam fluidui įtekant ir ištekant iš šilumokaičio, skirtumas, °C.

Užrašius šilumos balanso lygtį visam šilumokaičiui

$$Q_i = Q_i + Q_n \ ; \tag{3.40}$$

ir ją pertvarkius

$$G_i \cdot c_i \cdot \left(t_{i,p} - t_{i,g}\right) = \left(1{,}0 + e\right) \cdot G_i \cdot c_i \cdot \left(t_{i,g} - t_{i,p}\right); \tag{3.41}$$

galima apskaičiuoti bet kurį nežinomą parametrą.

Čia Q_i, Q_i, Q_n – atitinkamai įtekantis, ištekantis ir nuostolių šilumos srautas, W; $G_i \cdot c_i \cdot (t_{i.p} - t_{i.g})$ – šildančiojo fluido fizikinės šilumos kiekio sumažėjimas, jo temperatūrai nuo $t_{i.p}$ sumažėjus iki $t_{i.g}$; $G_i \cdot c_i \cdot (t_{i.g} - t_{i.p})$ – šildomojo fluido fizikinės šilumos kiekio padidėjimas, pakėlus jo temperatūrą nuo $t_{i.p.}$ iki $t_{i.g.}$; e – šilumos nuostolių dalis nuo naudingai sunaudoto šilumos kiekio.

Labai dažnai chemijos pramonėje šildančiuoju agentu naudojami vandens garai. Drėgnų sočiųjų garų kondensacijos metu atiduotas šilumos srautas apskaičiuojamas taip:

$$Q = D \cdot r \cdot (1 - x). \qquad (3.42)$$

Be to, būtina įvertinti iš susidariusio kondensato gaunamą fizikinę šilumą ($D_k \cdot c_{m.k} \cdot \Delta t$). Šildant vandens garais tiesiogiai šilumos balanso lygtis užrašoma taip:

$$D \cdot r(1 - x) + D_k \cdot c_{m.k} \cdot (t_{k.p} - t_{s.g}) = G_s \cdot c_{m.s} \cdot (t_{s.g} - t_{s.p}) + Q_n; \qquad (3.43)$$

čia $D \cdot r(1 - x)$ – drėgnų sočiųjų garų kondensacijos proceso metu išsiskyręs šilumos srautas, W; D –šildymui sunaudotų sočiųjų garų debitas, kg/s; r – garų susidarymo/kondensacijos šiluma, J/kg; x – sočiųjų garų drėgnumo laipsnis, masės dalimis (dažniausiai x = 0,05–0,1); $D_k \cdot c_{m.k} \cdot (t_{k.p} - t_{s.g})$ – nuo temperatūros $t_{k.p}$ iki $t_{s.g}$ vėstančio kondensato šildomam skysčiui atiduotas šilumos srautas, W; D_k – susidariusio kondensato debitas, $D_k = D$, kg/s; $c_{m.k}$ – kondensato vidutinė savitoji šiluma, J/(kg·K); $t_{k.p}$ – susidariusio kondensato pradinė temperatūra (kondensacijos temperatūra), $t_{k.p} = t_{s.v.g}$, °C; $G_s \cdot c_{m.s} \cdot (t_{s.g} - t_{s.p})$ – šildomo skysčio fizikinės šilumos srauto padidėjimas, pakėlus jo temperatūrą nuo $t_{s.p.}$ iki $t_{s.g}$, W; G_s – šildomo skysčio masė debitas, kg/s; $c_{m.s}$ – šildomo skysčio savitoji šiluma, J/(kg·K); $t_{s.p}$ – šildomo skysčio pradinė temperatūra, °C; $t_{s.g}$ – šildomo skysčio galinė temperatūra, °C; Q_n – šilumos nuostolių į aplinką srautas, W.

3.2. Uždavinių sprendimo pavyzdžiai

3.1. Pvz. Apskaičiuoti konvekcijos būdu pernešamų šilumos srautų tankius tekant: a) vandeniui w_1 = 1,2 m/s greičiu ir b) atmosferinio slėgio orui w_2 = 12 m/s greičiu, jei abiejų fluidų temperatūra t = 80 °C.

S p r e n d i m a s. Konvekcinio šilumos srauto tankis apskaičiuojamas pagal (3.20) lygtį:

1) tekant vandeniui:

$$q_1 = \rho_1 \cdot w_1 \cdot c_{p1} \cdot t_1 = 972 \cdot 1{,}2 \cdot 4{,}19 \cdot 10^3 \cdot 80 = 391 \cdot 10^6 \ \text{W/m}^2;$$

čia ρ_1 ir c_{p1} – 80 °C temperatūros vandens tankis ir savitoji šiluma (ρ_1 = 972 kg/m^3; c_{p1} = 4,19·10^3 J/(kg·K)).

2) tekant orui

$$q_2 = \rho_2 \cdot w_2 \cdot c_{p2} \cdot t_2 = 1{,}00 \cdot 12 \cdot 984{,}7 \cdot 80 = 945 \cdot 10^3 \ \text{W/m}^2;$$

kai oro tankis ρ_2 apskaičiuojamas pagal dujų būsenos lygtį

$$\rho_2 = \frac{M_\mu}{V_o} \cdot \frac{p_2}{p_o} \cdot \frac{T_o}{T_2} = \frac{29}{22{,}4} \cdot \frac{1{,}013 \cdot 10^5 \cdot 273}{1{,}013 \cdot 10^5 \cdot (273+80)} = 1{,}00 \ \text{kg/m}^3;$$

čia $M_\mu = 29$ kg/kmol – oro kilomolio masė, išreikšta kilogramais; $p_o = 1{,}013 \cdot 10^5$ – oro slėgis normaliomis sąlygomis (760 mm Hg), Pa. Oro savitoji šiluma c_{p2} parenkama IV pav. nomogramoje, esant 80 °C temperatūrai;
$c_{p2} = 0{,}235 \cdot 4{,}19 \cdot 10^3 = 984{,}7$ J/(kg·K).

Vanduo teka 10 kartų lėčiau, bet dėl didesnio tankio bei savitosios šilumos, jis perneša 414 kartų didesnį šilumos srautą nei oras.

3.2. Pvz. Nustatyti 120 °C temperatūros nitrobenzeno šilumos laidumo koeficiento vertę.

S p r e n d i m a s. Apskaičiuojama λ vertė, esant 30 °C temperatūrai:

$$\lambda_{30} = A \cdot c \cdot \rho \cdot (\rho / M_\mu)^{1/3};$$

čia $A = 4{,}22 \cdot 10^{-8}$ – neasocijuotiems skysčiams; $c = 1380$ J/(kg·K) (iš XI lentelės); $\rho_{30} = 1200$ kg/m^3 (iš III lentelės); $M_\mu = 123$ kg/kmol.

$$\lambda_{30} = 4{,}22 \cdot 10^8 \cdot 1380 \cdot 1200 \cdot (1200/123)^{1/3} = 0{,}149 \ \text{W/(m·K)}.$$

Nitrobenzeno λ vertę, esant 120 °C temperatūrai apskaičiuojama:

$$\lambda_{120} = \lambda_{30} \cdot [1 - \chi \cdot (t - 30)] = 0{,}149 \cdot [1 - 1{,}0 \cdot 10^{-3} \cdot (120 - 30)] = 0{,}136 \ \text{W/(m·K)}.$$

čia nitrobenzeno $\chi = 1{,}0 \cdot 10^{-3}$ °C^{-1} (žr. 3.13 lygtį).

3.3. Pvz. Apskaičiuoti šilumos nuostolius į aplinką nuo tunelinės krosnies pašildymo zonos dalies sienų ir skliauto. Krosnies plotis $b = 30$ m; aukštis $h = 2{,}2$ m; pašildymo zonos ilgis $l = 22$ m. Krosnies sienos vidinio paviršiaus temperatūra zonos pradžioje 730 °C, zonos pabaigoje 1000 °C. Krosnies siena šioje zonos dalyje sumūryta iš trijų sluoksnių: 1) ugniai atsparių chromo magnezitinių plytų, kurių $\rho_1 = 3000$ kg/m^3, sluoksnio storis $\delta_1 = 230$ mm; 2) šilumą izoliuojančių diatomitinių plytų, kurių $\rho_2 = 750$ kg/m^3, $\delta_2 = 250$ mm; 3) konstrukcinių keraminių plytų, kurių $\rho_3 = 1800$ kg/m^3, $\delta_3 = 500$ mm. Krosnies skliautas įrengtas iš 1) plokščių pakabinamų šamoto elementų, kurių $\rho_4 = 1900$ kg/m^3, $\delta_4 = 900$ mm; 2) diatomito miltelių užpilo, kurio $\rho_5 = 500$ kg/m^3, $\delta_5 = 260$ mm; 3) gelžbetoninės plokštės, kurios $\rho_6 = 2300$ kg/m^3, $\delta_6 = 200$ mm.

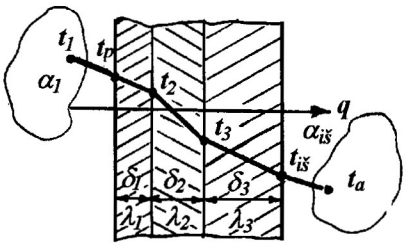
S p r e n d i m a s. Vidutinė aplinkos oro temperatūra Lietuvos klimato sąlygomis yra +15 °C. Reikia teisingai nustatyti, kiek šilumos srauto praeina per trisluoksnes krosnies vertikalias sienas bei skliautą į aplinkos orą. Todėl būtina

įvertinti atskirų sluoksnių šilumos laidumo koeficiento pokytį, kintant temperatūrai nuo 730 °C iki 1000 °C, taip pat sienos sluoksnių storyje. Sluoksnių šiluminės varžos, nustatant šilumos srauto dydį, turi būti apskaičiuotos pagal vidutines λ_i vertes skaičiuojamai zonos daliai. Kadangi sluoksnių ribojimosi taškų temperatūros nežinomos, tai šilumos srautų tankius (nuostolius) skaičiuojame iteraciniu metodu, palygindami sluoksnių ribojimosi taškų temperatūrų nukrypimo dydį nuo pasirinktų verčių.

Pirmiausia apskaičiuojame krosnies zonos vidinio paviršiaus vidutinę temperatūrą:

$$t_{p,m} = \left(t_{p,pr} + t_{p,g}\right)/2 = \left(730 + 1000\right)/2 = 865 \text{ °C}.$$

Įvertinę atskirų sluoksnių laidumą šilumai bei sluoksnio storį ir atsižvelgę į krosnių praktinio eksploatavimo duomenis, pirmam palyginamojo skaičiavimo atvejui imame tokias sluoksnių ribojimosi taškų temperatūras (3.3 pav.):



3.3 pav. Temperatūrų pasiskirstymo trisluoksnėje krosnies sienoje schema

$t_2 = (0{,}8–0{,}9)\cdot t_{p\,m}$; $t_3 = (0{,}6–0{,}7)\cdot t_2$;

$t_{iš} = (0{,}2–0{,}4)\cdot t_3$; $t_{p\,m} = 865$ °C;

$t_2 = 0{,}9\cdot t_{p\,m} = 0{,}9\cdot 865 = 778$ °C;

$t_3 = 0{,}6\cdot t_2 = 0{,}6\cdot 778 = 467$ °C;

$t_{iš} = 0{,}2\cdot t_3 = 0{,}2\cdot 467 = 94$ °C.

Dabar galime apskaičiuoti atskirų sluoksnių vidutines zonos temperatūras ir vidutines sluoksnių šilumos laidumo koeficientų vertes, esant šioms temperatūroms:

a) ugniai atsparaus sluoksnio vidutinė temperatūra:

$$t_{m,1} = \left(t_p + t_2\right)/2 = \left(865 + 778\right)/2 = 821{,}5 \text{ °C}.$$

Ugniai atsparių chromo magnezitinių plytų $\lambda = f(t)$ lygtis parenkama iš XIX lentelės pagal medžiagą ir jos tankį ($\rho_1 = 3000$ kg/m^3):

$$\lambda_{m,1} = 2{,}8 - 0{,}00098\cdot t_{m,1} =$$

$$= 2{,}8 - 0{,}00098\cdot 821{,}5 = 2{,}8 - 0{,}805 = 1{,}995 \text{ W/(m·K)};$$

b) šilumą izoliuojančių diatomitinių plytų ($\rho_2 = 750$ kg/m^3):

$$t_{m,2} = \left(t_2 + t_3\right)/2 = \left(778 + 467\right)/2 = 622{,}5 \text{ °C};$$

$$\lambda_{m,2} = 0{,}17 + 0{,}00035\cdot t_{m,2} = 0{,}17 - 0{,}00035\cdot 622{,}5 = 0{,}388 \text{ W/(m·K)};$$

c) konstrukcinių keraminių plytų (ρ_3 = 1800 kg/m^3):

$$t_{m,3} = (t_3 + t_{iš})/2 = (467 + 94)/2 = 280{,}5 \text{ °C};$$

$$\lambda_{m,3} = 0{,}47 + 0{,}00051 \cdot t_{m,3} = 0{,}47 - 0{,}00051 \cdot 280{,}5 = 0{,}613 \text{ W/(m·K)}.$$

Norint apskaičiuoti šilumos perdavimo koeficientą K pagal (3.19) lygtį, reikia nustatyti krosnies sienos išorinio paviršiaus šilumos atidavimo orui koeficientą $\alpha_{iš}$, įvertinus šilumos srauto sklidimo kryptį. Horizontaliam šilumos srautui K_d = 2,6, todėl $\alpha_{iš}$ apskaičiuojamas taip:

$$\alpha_{iš} = 2{,}6 \cdot (T_{iš} - T_a)^{1/4} + \frac{5{,}7 \cdot \varepsilon[(T_{iš}/100)^4 + (T_a/100)^4]}{T_{iš} - T_a} =$$

$$= 2{,}6 \cdot (367 + 288)^{1/4} + \frac{5{,}7 \cdot 0{,}93[(367/100)^4 - (288/100)^4}{367 - 288} =$$

$$= 7{,}751 + 7{,}557 = 15{,}308 \text{ W/(m·K)};$$

čia ε = 0,93 – keraminių plytų mūro juodumo laipsnis.

Pirmajam atvejui pagal (3.30) lygtį apskaičiuojame šilumos perdavimo koeficientą:

$$K_1 = \left(\frac{\delta_1}{\lambda_{1m}} + \frac{\delta_2}{\lambda_2 m} + \frac{\delta_3}{\lambda_{3m}} + \frac{1}{\alpha_{iš}}\right)^{-1} =$$

$$= \left(\frac{0{,}230}{1{,}995} + \frac{0{,}250}{0{,}388} + \frac{0{,}500}{0{,}613} + \frac{1}{15{,}308}\right)^{-1} = 0{,}609 \text{ W/(m·K)}.$$

Apskaičiuojame šilumos srauto tankį q_1:

$$q_1 = K \cdot (t_p - t_a) = 0{,}609 \cdot (865 - 15) = 517{,}8 \text{ W/m}^2.$$

Esant šiam šilumos srautui, patikriname sienelės temperatūrą t_2:

$$t_2' = t_p - q_1 \frac{\delta_1}{\lambda_1} = 865 - 517{,}8 \frac{0{,}230}{1{,}995} = 865 - 59{,}7 = 805 \text{ °C}.$$

Pirmuoju atveju numatyta temperatūros t_2 vertė buvo 778 °C, todėl skirtumas $t_2' - t_2$ = 805 – 778 °C = 27 °C. Tai sudaro 27·100/778 = 3,5 % nuo numatytos temperatūros vertės (778 °C). Skaičiuojant iteraciniu metodu reikalaujama, kad temperatūros t_2' vertės nukrypimas nuo numatytos temperatūros t_2 neturi būti didesnis negu 3 % nuo absoliutaus jos dydžio.

Pirmuoju atveju šilumos srauto tankis gaunamas truputį per didelis, todėl reikia padidinti sluoksnių šiluminių varžų dydį. Jei $\delta = const$, tai įmanoma atlikti mažinant sluoksnių λ vertes, t. y. parenkant pakoreguotus t_2, t_3 ir $t_{iš}$ daugiklius.

Antrasis šiluminių srautų dydžių skaičiavimų būdas pagrįstas priartėjimo metodu. Priimame tokias temperatūrų vertes:

$$t_{p,m} = 865\ ^0C;\ t_2 = 0{,}918 \cdot t_{p,m} = 0{,}918 \cdot 865 = 794\ °C;$$

$$t_3 = 0{,}58 \cdot t_2 = 0{,}58 \cdot 794 = 460\ °C;$$

$$t_{iš} = 0{,}175 \cdot t_3 = 0{,}175 \cdot 460 = 80\ °C.$$

Skaičiuojame analogiškai kaip ir pirmuoju atveju:

a) chromo magnezitinių plytų sluoksniui:

$$t_{m,1} = (865 + 794)/2 = 829{,}5\ °C;$$

$$\lambda_{m,1} = 2{,}8 - 0{,}00098 \cdot 829{,}5 = 2{,}8 - 0{,}805 = 1{,}987\ \text{W/(m·K)}.$$

b) diatomitinių plytų sluoksniui:

$$t_{m,2} = (794 + 460)/2 = 627\ °C;$$

$$\lambda_{m,2} = 0{,}17 + 0{,}00035 \cdot 627 = 0{,}389\ \text{W/(m·K)}.$$

c) konstrukcinių keraminių plytų sluoksniui:

$$t_{m,3} = (460 + 80)/2 = 270\ °C;$$

$$\lambda_{m,3} = 0{,}47 + 0{,}00051 \cdot 270 = 0{,}608\ \text{W/(m·K)};$$

$$\alpha_{iš} = 2{,}6 \cdot (353 - 288)^{0{,}25} + \frac{5{,}7 \cdot 0{,}93[(353/100)^4 - (288/100)^4}{353 - 288} =$$

$$= 7{,}382 + 7{,}053 = 14{,}435\ \text{W/(m}^2\text{·K)}.$$

Šilumos perdavimo koeficientas K antruoju skaičiavimo atveju:

$$K_2 = (\frac{0{,}230}{1{,}987} + \frac{0{,}250}{0{,}389} + \frac{0{,}500}{0{,}608} + \frac{1}{14{,}435})^{-1} = 0{,}606\ \text{W/(m}^2\text{·K)}.$$

Šilumos srauto tankis antruoju atveju:

$$q_2 = 0{,}606 \cdot (865 - 15) = 515{,}1\ \text{W/m}^2.$$

Patikriname gaunamos temperatūros t_2' vertę:

$$t_2' = 865 - 515{,}1\frac{0{,}230}{1{,}987} = 865 - 59{,}6 = 805 \text{ °C}.$$

Antruoju atveju $t_2' - t_2 = 805 - 794 = 11$ °C, tai sudaro $11 \cdot 100/794 = 1{,}4$ % nukrypimą nuo numatytos vertės, todėl, naudodami šią šilumos srauto tankio q_2 vertę, pakankamu tikslumu galime apskaičiuoti vidutinius šilumos nuostolius į aplinką per vertikalias krosnies pašildymo zonos dalies sienas:

$$Q_n = 2 \cdot l \cdot h \cdot q_2 = 2 \cdot 22 \cdot 2{,}2 \cdot 515{,}1 = 49861{,}68\,, \quad W = 49{,}862 \text{ kW}.$$

Analogiškai apskaičiuojamas ir šilumos nuostolių į aplinką *per krosnies skliautą* dydis, tik šiuo atveju *šilumos srautas sklinda į viršų*, todėl (3.19) lygtyje $\alpha_{iš}$ vertės nustatymui reikia naudoti koeficientą $K_d = 3{,}3$ (o ne 2,6); be to, atitinkamai pakoreguoti ε, sluoksnių ribojimosi taškų temperatūrų bei šiluminių varžų vertes.

3.4. Pvz. Apskaičiuoti iki kokios maksimalios temperatūros įšils plieninės sienelės išorinis paviršius. Sienelės storis $\delta = 34$ mm. Per sienelę perduodama 0,4 MPa absoliučiojo slėgio sočiųjų vandens garų kondensacijos šiluma: a) atmosferinio slėgio orui, kurio temperatūra 30 °C; b) tokios pačios temperatūros vandeniui. Taip pat įvertinti teršalų susidarymą ant abiejų sienelės paviršių, jei vandens kokybė vidutinė. Šilumos atidavimo koeficientų vertes parinkti iš 3.3 lentelės, kai oro ir vandens tekėjimo pobūdis turbulentinis.

S p r e n d i m a s. Vandens garų kondensacijos temperatūra, esant 0,4 MPa absoliučiajam jo slėgiui, parenkama XVII lentelėje ($t_g = 143$ °C). Kadangi metalai pasižymi geru laidumu šilumai, sienelės storis yra nedidelis (4 mm) ir šildančiojo fluido temperatūra palyginti neaukšta, tai techniniuose šilumos srauto skaičiavimuose galima teigti, kad λ vertė sienelėje pakinta nežymiai, t. y. $\lambda = const$. Plieno $\lambda = 46{,}5$ W/(m·K) (XII lentelė).

Šilumos atidavimo koeficientų vertės parenkamos 3.3 lentelėje:

$$\alpha_g = 10000 \text{ W/(m}^2\text{·K)}; \; \alpha_{oro} = 50 \text{ W/(m}^2\text{·K)} \text{ ir } \alpha_{H2O} = 3000 \text{ W/(m}^2\text{·K)}.$$

Sienelės teršalų šiluminę varžą įvertinančios teršalų šiluminio laidumo vertės parenkamos XIII lentelėje: vandens garų $1/r_{š,g} = 5800$ W/(m^2·K); oro $1/r_{š,oro} = 2800$ W/(m^2·K) ir vidutinės kokybės vandens $1/r_{š,H2O} = 2400$ W/(m^2·K).

Temperatūrų kitimo sienelėje pobūdis, esant nuostoviajam šilumos srautui, pateiktas 3.4 pav.

a) *šiluma perduodama orui.* Apskaičiuojame garų šilumos perdavimo orui koeficientą K_1 pagal (3.30) lygtį:

$$K_1 = \left(\frac{1}{10000} + \frac{1}{5800} + \frac{0{,}004}{46{,}5} + \frac{1}{2800} + \frac{1}{50}\right)^{-1} = 48{,}2 \text{ W/(m}^2\text{·K)}.$$

Perduodamo orui šilumos srauto tankis apskaičiuojamas:

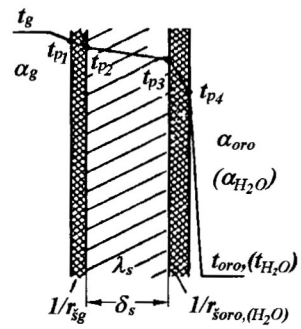
$$q_1 = K_1 \cdot (t_g - t_{oro}) = 48{,}2 \cdot (143 - 30) =$$

$$= 5440 \text{ W/m}^2.$$

Maksimali plieninės sienelės temperatūra t_{p2} (3.4 pav.) nustatoma, įvertinus garų ir garuose esančių teršalų (dažniausiai – tepalo) sudaromas šilumines varžas šilumos srauto kelyje:

$$t_{p,2} = t_g - q_1 \cdot (1/\alpha_g + 1/r_{p,š,g}) =$$

$$= 143 - 5440 \cdot (1/10000 + 1/5800) = 141{,}5 \text{ °C}$$



3.4 pav. Vandens garų kondensacijos šilumos perdavimo per daugiasluoksnę sienelę schema

b) *šiluma perduodama vandeniui.* Šiuo atveju šilumos perdavimo nuo garų vandeniui koeficientas K_2 skirsis nuo K_1 tik paskutinės šiluminės varžos verte $r_{š\,H2O} = 1/3000$:

$$K_2 = (\frac{1}{10000} + \frac{1}{5800} + \frac{0{,}004}{46{,}5} + \frac{1}{2800} + \frac{1}{3000})^{-1} = 952 \text{ W/(m}^2\text{·K)}.$$

Perduodamo vandeniui šilumos srauto tankis:

$$q_2 = K_2 \cdot (t_g - t_{H_2O}) = 952 \cdot (143 - 30) = 107900 \text{ W/m}^2.$$

Maksimali plieninės sienelės kairiojo paviršiaus temperatūra:

$$t_{p,2} = 143 - 107900 \cdot (1/10000 + 1/5800) = 123{,}7 \text{ °C}.$$

Analogišku būdu, žinant šilumos srautų tankių q_1 ir q_2 vertes bei plieninės sienelės šiluminę varžą δ_s/λ_s, iš šilumos srauto tankio pastovumo sąlygos

$q_1 = q_2 = ... = q_n$ galime apskaičiuoti ir $t_{p,3}$ arba $t_{p,4}$ vertes abiem atvejams.

3.5. Pvz. 200 kg/h sočiųjų amoniako garų, kurių temperatūra t_g = 95 °C, kondensuojama, esant 1,19 MPa slėgiui. Iš kondensatoriaus ištekančio kondensato temperatūra 5 °C žemesnė už kondensacijos temperatūrą t_s. Nustatyti, koks vandens debitas kondensatoriuje turi būti, jei įtekančio vandens temperatūra t_{v1} = 15 °C, o minimalus leidžiamas temperatūrų skirtumas tarp fluidų 5 °C.

S p r e n d i m a s. Amoniako *T–S* diagramoje parenkame, kad, esant slėgiui p_{abs} = 1,19 MPa, amoniako soties (kondensacijos) temperatūra t_s = 30 °C. Todėl į kondensatorių patenka perkaitinti amoniako garai, ir iš pradžių kondensatoriuje amoniakas ataušinamas nuo 95 °C iki 30 °C (kondensacijos temperatūros). Toliau amoniakas izotermiškai kondensuojamas, esant soties temperatūrai, ir susi-

daręs kondensatas ataušinamas 5 °C, t. y. iki $t_k = t_s - 5 = 30 - 5 = 25$ °C. Taigi amoniakui kondensuojantis bendrasis atiduodamas šilumos srautas susideda iš perkaitintų garų aušinimo šilumos srauto ($Q_{a.p.g}$), kondensacijos proceso metu išsiskiriančio šilumos srauto ($Q_{g.k}$) ir susidariusio skysto kondensato aušinimo metu išsiskiriančio šilumos srauto ($Q_{a.s.k}$) sumos:

$$Q_b = Q_{a,p,g} + Q_{g,k} + Q_{a,s,k} \cdot$$

Tokį šilumos srautą Q_b turi gauti tekantis aušinimo vanduo.

Apskaičiuojame perkaitintų garų aušinimo iki kondensacijos temperatūros atiduodamą šilumos srautą:

$$Q_{a,p,g} = G \cdot c_{m,p,g} \cdot (t_g - t_s) = 200/3600 \cdot 2{,}17 \cdot 10^3 \cdot (95 - 30) = 7{,}84 \cdot 10^3 \text{ W};$$

čia $c_{m.p.g}$ = 36,9 kJ/(kmol·K) = $36{,}9 \cdot 10^3/17 = 2{,}17 \cdot 10^3$ J/(kg·K) – perkaitintų amoniako garų vidutinė savitoji šiluma, parinkta esant vidutinei jų temperatūrai

$$t_m = (95 + 30)/2 = 62{,}5 \text{ °C}.$$

Sočiųjų amoniako garų kondensacijos šilumos srautas:

$$Q_{g,k} = G \cdot (h_g - h_{sk}) = 200/3600 \cdot (1470 \cdot 10^3 - 323 \cdot 10^3) = 63{,}6 \cdot 10^3 \text{ W};$$

čia $h_g = 1470 \cdot 10^3$ J/kg; $h_{sk} = 323 \cdot 10^3$ J/kg – sočiųjų amoniako garų ir skysto amoniako entalpijos, kai p_{abs} = 1,19 MPa.

Skysto amoniako (kondensato) aušinimo šilumos srautas:

$$Q_{a,sk} = G \cdot c_{m,sk} \cdot (t_s - t_k) = 200/3600 \cdot 4{,}19 \cdot 10^3 \cdot (30 - 25) = 1{,}16 \cdot 10^3 \text{ W};$$

čia $c_{m.sk} = 4{,}19 \cdot 10^3$ J/(kg·K) – vidutinė skysto amoniako savitoji šiluma, parinkta iš XI lentelės.

Bendrasis amoniako kondensacijos metu atiduodamas šilumos srautas:

$$Q_b = 7{,}84 \cdot 10^3 + 63{,}6 \cdot 10^3 + 1{,}16 \cdot 10^3 = 72{,}6 \cdot 10^3 \text{ W}.$$

Kadangi aušinančio vandens maksimali temperatūra turi būti žemesnė už minimalią amoniako kondensato temperatūrą ne mažiau kaip 5 °C, tai maksimali aušinančio vandens temperatūra $t_{v2} = t_k - 5 = 25 - 5 = 20$ °C.

Kad aušinančiam vandeniui įšylant nuo 15 °C iki 20 °C iš amoniako būtų pašalinamas Q_b dydžio šilumos srautas, reikia:

$$G_{H2O} = Q_b/[c_{mv}(t_{v2} - t_{v1})] = 72{,}6 \cdot 10^3/[4{,}19 \cdot 10^3(20 - 15)] = 3{,}47 \text{ kg/s};$$

čia $c_{mv} = 4{,}19 \cdot 10^3$ J/(kg·K) – vidutinė aušinančio vandens savitoji šiluma, esant $t_m = (20 + 15)/2 = 17{,}5$ °C.

3.6. Pvz. Horizontaliu vamzdžiu, kurio skersmuo d = 0,055 m, ilgis L = 2,0 m, vanduo teka w = 0,08 m/s greičiu. Vandens vidutinė temperatūra t_f = 40 °C. Vidinio vamzdžio paviršiaus temperatūra t_p = 70 °C. Apskaičiuoti vandens šilumos atidavimo koeficiento α vertę.

S p r e n d i m a s. Nustatome vandens tekėjimo pobūdį.

$Re = w \cdot d \cdot \rho / \mu = 0{,}08 \cdot 0{,}055 \cdot 992 / 0{,}657 \cdot 10^{-3} = 6644$;

čia ρ = 989 kg/m^3 ir $\mu = 0{,}657 \cdot 10^{-3}$ – 40 °C temperatūros vandens tankis ir dinaminė klampa.

Tekėjimo pobūdis – *pereinamasis*, todėl labiausiai tinkama funkcijos K vertė, kai $Re_f = 6{,}644 \cdot 10^3$; K = 22,3.

Lentelėje parenkame Pr kriterijų vertes: Pr = 4,31, esant t_f = 40 °C ir Per = 2,55, esant t_p = 70 °C. Pereinamojo tekėjimo atveju kriterijų lygties išraiška yra tokia:

$$22{,}34 = Nu \cdot Pr^{-0{,}43} \cdot \left(Pr / Pr_p\right)^{-0{,}25}.$$

Pasinaudoję bendra Nu kriterijaus išraiška ($Nu = \alpha \cdot d / \lambda$), gauname:

$$22{,}34 = \left[(\alpha \cdot 0{,}055)/(0{,}634)\right] \cdot 4{,}31^{-0{,}43} \cdot (4{,}31/2{,}55)^{-0{,}25};$$

$$\alpha = \left[\left(22{,}34 \cdot 4{,}31^{0{,}43} 1{,}69^{0{,}25} \cdot 0{,}634\right)\right] / 0{,}55 = 549 \ \text{W/(m}^2\text{·K)};$$

čia λ = 0,634 W/(m·K) – 40 °C temperatūros vandens šilumos laidumo koeficientas.

3.7. Pvz. Horizontaliais vamzdžiais, kurių skersmuo d = 21 mm ir ilgis L = 4,0 m, w = 0,05 m/s greičiu teka toluenas, kurio vidutinė temperatūra t_f = 30 °C. Apskaičiuoti vamzdžio sienelės šilumos atidavimo koeficientą toluenui, jei sienelės vidinio paviršiaus temperatūra t_p = 50 °C.

S p r e n d i m a s. Nustatome tolueno tekėjimo pobūdį:

$$Re = w \cdot d \cdot \rho / \mu = \left(0{,}05 \cdot 0{,}021 \cdot 856\right) / \left(0{,}522 \cdot 10^{-3}\right) = 1720;$$

čia ρ = 856 kg/m^3 ir $\mu = 0{,}522 \cdot 10^{-3}$ Pa·s – tolueno tankis (iš III lentelės) ir dinaminė klampa (iš I pav.), esant t_f = 30 °C.

Tolueno tekėjimo pobūdis – *laminarinis* (Re < 2300), todėl α nustatymui naudojame lygtį:

$$Nu_f = 0{,}15 \cdot Re_f^{0{,}33} \cdot Pr_f^{0{,}43} \cdot Gr_f^{0{,}1} \cdot \left(Pr_f / Pr_p{}^{0{,}25}\right) \cdot \varepsilon_l.$$

Pr_f = 5,8, esant t_f = 30 °C ir Pr_p = 5,4, esant t_p = 50 °C. Grashofo kriterijaus vertę apskaičiuojame pagal (3.57) lygtį:

$$Gr = \left(\beta \cdot g \cdot \rho^2 \cdot d^3 \cdot \Delta t\right) / \mu^2 =$$

$$= \left[1{,}09 \cdot 10^{-3} \cdot 9{,}81 \cdot 857^2 \cdot 0{,}021^3 \cdot (50 - 30)\right] / \left(0{,}54 \cdot 10^{-3}\right)^2 = 4{,}988 \cdot 10^6;$$

$$L/d = 4{,}0/0{,}021 = 190.$$

Iš priedų lentelės parenkame $\varepsilon_l = 1{,}0$. Tada:

$$\left(\alpha \cdot 0{,}021\right)/0{,}145 = 0{,}15 \cdot 1720^{0{,}33} \cdot 5{,}8^{0{,}43} \cdot \left(4{,}988 \cdot 10^6\right)^{0{,}1} \cdot (5{,}8/5{,}4)^{0{,}25} \cdot 1;$$

$\alpha = 123$ W/(m^2·K).

3.8. Pvz. Nustatyti šilumos atidavimo koeficientą α vamzdžių vidinio paviršiaus verdančiam toluenui. Vertikalių vamzdžių skersmuo 21 mm, jų vidinio paviršiaus temperatūra $t_p = 128$ °C. Toluenas verda, esant atmosferiniam slėgiui.

S p r e n d i m a s. Lentelėse randame, kad, esant atmosferiniam slėgiui, tolueno virimo temperatūra $t_s = 110{,}6$ °C. Tada temperatūrų skirtumas

$$\Delta t_{vir} = t_p - t_s = 128 - 110{,}6 = 18{,}4 \text{ °C}.$$

Vidutinę α vertę apskaičiuojame pagal lygtį:

$$\alpha = b^3 \cdot \frac{\lambda^2 \cdot \rho_{sk} \cdot (\Delta t_{vir})^2}{\mu \cdot \sigma \cdot T_s} =$$

$$= 0{,}093^3 \cdot \frac{0{,}116^2 \cdot 777 \cdot 18{,}4^2}{0{,}251 \cdot 10^{-3} \cdot 18{,}35 \cdot 10^{-3} \cdot 383{,}6} = 1430 \text{ W/(m}^2\text{·K)};$$

čia visi fizikiniai skysto tolueno parametrai parenkami pagal t_s = 110,6 °C: $\rho_{sk} = 777$ kg/m^3 (III lentelė); λ = 0,116 W/(m·K); μ = 0,251·10^{-3} Pa·s; $\sigma = 18{,}35 \cdot 10^{-3}$ N/m.

Proporcingumo koeficientas b apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$b = 0{,}075 + 0{,}75 \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_{sk} - \rho_g}\right)^{2/3} = 0{,}075 + 0{,}75 \cdot \left(\frac{2{,}90}{777 - 2{,}9}\right)^{2/3} = 0{,}093.$$

Tolueno sočiųjų garų tankis apskaičiuojamas pagal idealių dujų būvio lygtį:

$$\rho_g = \frac{M_\mu \cdot T_o \cdot p}{V_o \cdot T \cdot p_o} = \frac{92{,}1 \cdot 273 \cdot 101308}{22{,}4 \cdot 383{,}6 \cdot 101308} = 2{,}90 \text{ kg/m}^3;$$

čia tolueno $M_\mu = 92{,}1$ kg/kmol.

3.9. Pvz. Nustatyti dviejų ėjų vamzdinio korpusinio šilumokaičio reikalingą šilumokaitos paviršiaus plotą ir vamzdžių ilgį, jei vamzdžiais tekantis 800 mm Hg absoliučiojo slėgio oras šilumokaityje pašildomas nuo $t_{pr} = 2$ °C iki $t_g = 90$ °C. Oro debitas normaliomis sąlygomis $V_o = 8500$ m^3/h. Šilumokaičio vamzdžių skaičius $n = 450$; jų skersmuo (38×2) mm. Oras pašildomas tarpvamzdėje ertmėje kondensuojantis 196,2 kPa absoliučiojo slėgio sotiesiems vandens garams. Garų šilumos atidavimo koeficientas $\alpha_g = 9700$ W/(m^2·K). Įvertinti ant vamzdžių sienelių paviršių susidariusių teršalų šilumos varžas.

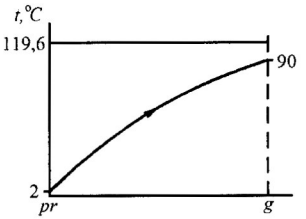
S p r e n d i m a s. Oro masės debitas:

$$G_s = V_0 \cdot \rho_0/3600 = (8500 \cdot 1{,}29)/3600 = 3{,}04 \text{ kg/s};$$

čia $\rho_o = 1{,}29$ kg/m^3 – oro tankis normaliomis sąlygomis.

Fluidų temperatūrų kitimo šilumokaityje schema pateikta 3.5 pav.

Vandens garų kondensacijos temperatūra parenkama iš XVII lentelės, esant $p_{abs} = 196{,}2$ kPa; $t_g = 119{,}6$ °C. Krašteniai temperatūrų skirtumai tarp fluidų šilumokaityje:



3.5 pav. Oro temperatūros šilumokaityje kitimas, šildant jį besikondensuojančiais sočiaisiais vandens garais (3.9. Pvz.)

$$\Delta t_{max} = 119{,}6 - 2 = 117{,}6 \text{ °C},$$

$$\Delta t_{min} = 119{,}6 - 90 = 29{,}6 \text{ °C}.$$

Vidutinis temperatūrų skirtumas Δt_m apskaičiuojamas pagal (3.38) lygtį:

$$\Delta t_m = [(273 + 117{,}6) - (273 + 29{,}6)]/\ln[(273 + 117{,}6)/(273 + 29{,}6)] =$$

$$= 63{,}8 \text{ °C}.$$

Vidutinė pašildomo oro temperatūra apskaičiuojama pagal lygtį:

$$t_m = t_s - \Delta t_m = 119{,}6 - 63{,}8 = 55{,}8 \text{ °C}.$$

Oro tankis, esant vidutinei temperatūrai, apskaičiuojamas pagal dujų būvio lygtį:

$$\rho = (\rho_o \cdot T_o \cdot p)/(p_o \cdot T) = [1{,}29 \cdot 800 \cdot 273]/[760(273 + 55{,}8)] = 1{,}09 \text{ kg/m}^3.$$

Apskaičiuojame darbinėmis sąlygomis pratekančio oro tūrio debitą:

$$V_s = G_s/\rho = 3{,}04/1{,}09 = 2{,}78 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Esant tokiam debitui, vamzdžiais pratekančio oro vidutinis greitis yra:

$$w = 2{,}78/[(450/2)(0{,}785 \cdot 0034^2)] = 15{,}7 \text{ m/s}.$$

Įvertiname oro tekėjimo pobūdį esant šiam greičiui:

$Re = (w \cdot d \cdot \rho)/\mu = (15{,}7 \cdot 0{,}034 \cdot 1{,}09)/(0{,}020 \cdot 10^{-3}) = 29100;$

čia $\mu = 0{,}020 \cdot 10^{-3}$ Pa·s – oro dinaminė klampa, esant $t_m = 55{,}8$ °C.

Oro $Re = 29100 > 10^4$, todėl esant turbulentiniam jo tekėjimo pobūdžiui, α_{oro} apskaičiuojamas pagal lygtį:

$Nu = 0{,}018\, Re^{0{,}8}\, \varepsilon_l = 0{,}018 \cdot 29100^{0{,}8} \cdot 1{,}0 = 67{,}4;$

čia $\varepsilon_l = 1{,}0$, įvertinus, kad mažiausias standartinis vamzdžių ilgis yra 1 arba 2 m.

Tada vidinio vamzdžio sienelės paviršiaus šilumos atidavimo orui koeficientas α:

$\alpha = (Nu \cdot \lambda)/d = 69{,}4 \cdot 0{,}0284/0{,}034 = 56{,}2$ W/(m^2·K);

čia $\lambda = 0{,}0284$ W/(m·K) – oro šilumos laidumo koeficientas, esant $t_m = 55{,}8$ °C.

Žinant garų bei oro α ir įvertinus plieninės vamzdžio sienelės ir teršalų sluoksnių šilumines varžas, pagal (3.30) lygtį apskaičiuojame šilumos perdavimo koeficientą K:

$K = (1/9700 + 1/5800 + 0{,}002/46{,}5 + 1/2800 + 1/56{,}2)^{-1} = 54{,}3$ W/(m^2·K);

čia 5800 ir 2800 – garų ir oro teršalų šilumos atidavimo koeficientai, W/(m^2·K);
$\delta = 0{,}002$ m – vamzdžio sienelės storis; $\lambda = 46{,}5$ – plieno šilumos laidumo koeficientas, W/(m·K).

Apskaičiuojame šilumos srautą, reikalingą oro pašildymui:

$Q = G_s \cdot c \cdot (t_g - t_{pr}) = 3{,}04 \cdot 1{,}01 \cdot 10^3 \cdot (90 - 2) = 270 \cdot 10^3$ W;

čia $c = 1{,}01 \cdot 10^3$ J/(kg·K) – oro savitoji šiluma, kai $t_m = 55{,}8$ °C (V lentelė).

Reikalingą šilumokaitos paviršiaus plotą apskaičiuojame pagal (3.28) lygtį:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_m} = \frac{270 \cdot 10^3}{54{,}3 \cdot 63{,}8} = 77{,}8 \text{ m}^2.$$

Kadangi šiuo šilumos perdavimo atveju α_{or} *daug kartų mažesnis už* α_g ($\alpha_{oro} = 56{,}2 \ll 9700 = \alpha_g$), tai šilumokaitai reikalingas vamzdžių ilgis apskaičiuojamas pagal jų *vidinį skersmenį, t. y.* $d = 0{,}034$ m:

$L = F/(n \cdot \pi \cdot d) = 77{,}8/(450 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}034) = 1{,}62$ m.

Standartiniai dviejų ėjų šilumokaičių vamzdžių ilgiai yra: 2; 3; 4; 6 m, todėl vamzdžių ilgį L priimame $L = 2{,}0$ m.

Šiuo atveju $L/d = 2000/34 = 59 > 50$, ir tai patvirtina, kad priimta $\varepsilon_l = 1{,}0$ vertė yra teisinga.

3.3. Kontroliniai uždaviniai

3.1. Apskaičiuoti temperatūros gradientą šilumos srautui plintant per vertikalią plokščią betoninę sienelę, jei sienelės vidinio paviršiaus temperatūra 25 °C, o išorinio paviršiaus temperatūra 20 °C. Sienelės storis 250 mm.

3.2. Apskaičiuoti šilumos srauto tankį, temperatūras atskirų sluoksnių kontakto paviršiuje ir temperatūros gradientus atskiruose trijų sluoksnių sienelės sluoksniuose. Sienelę sudaro emalio, konstrukcinio plieno ir akmens vatos sluoksniai, kurių storiai atitinkamai 0,7; 12 ir 25 mm. Vidinio sienelės paviršiaus temperatūra 185 °C, išorinio paviršiaus 45 °C. Skaičiavimo rezultatus pavaizduoti grafiškai.

3.3. Apskaičiuoti konvekcinių šilumos srautų tankius. Šilumos srautai pernešami judėjimo kryptimi: a) atmosferinio slėgio sočiaisiais etanolio garais, kurių judėjimo greitis 0,9 m/s; b) skystu etanoliu, jam tekant 0,1 m/s greičiu. Abiem atvejais srauto temperatūra lygi etanolio virimo temperatūrai, esant atmosferiniam slėgiui.

3.4. Kiek kartų padidės (38×2,5) mm skersmens plieninio vamzdžio sienelės terminė varža, jei jo paviršių padengsime 0,5 mm storio emalio sluoksniu.

3.5. Apskaičiuoti šilumos nuostolius nuo 40 m ilgio ir (51×2,5) mm skersmens garotiekio, izoliuoto 30 mm storio izoliacijos sluoksniu. Izoliacijos šilumos laidumo koeficientas $\lambda = 0{,}116$ W/(m·K); jos išorinio sluoksnio temperatūra 45 °C, vamzdžio vidinio paviršiaus temperatūra 175 °C.

3.6. Apskaičiuoti vieno metro plieninio (60×3) mm skersmens vamzdžio, izoliuoto 30 mm kamščio ir 40 mm sovelito sluoksniu, šilumos nuostolius į aplinką. Vidinio vamzdžio paviršiaus temperatūra 110 °C, sovelito išorinio paviršiaus temperatūra 10 °C.

3.7. Apskaičiuoti: a) 20 °C skysto chloroformo; b) 160 °C temperatūros ir atmosferinio slėgio SO_2; c) 25 % koncentracijos ir 30 °C temperatūros kalcio chlorido tirpalo šilumos laidumo koeficientus.

3.8. Esant atmosferiniam slėgiui ir virimo temperatūrai, išgarinama 1650 kg/h tolueno. Apskaičiuoti reikalingas šildančiųjų vandens garų sąnaudas, jei: a) naudojami $p_m = 0{,}40$ MPa perteklinio slėgio sausi sotieji vandens garai; b) naudojami perkaitinti iki 250 °C, $p = 0{,}40$ MPa absoliutinio slėgio vandens garai. Perkaitintų vandens garų savitoji šiluma $c = 2{,}14$ kJ/(kg·K). Ištekančio šildančių garų kondensato temperatūra lygi garų kondensacijos temperatūrai.

3.9. Tiesioginiu būdu šildant 2 t tirpalo, per 2,5 valandos šildymui sunaudojama 200 kg sausų sočiųjų vandens garų, kurių perteklinis slėgis $p_m = 3$ kgf/cm^2. Aparato pašildymo šilumos sąnaudų ir nuostolių į aplinką suma lygi 2,03 kW. Tirpalo temperatūra prieš šildymą 10 °C, jo savitoji šiluma $c = 2{,}50$ kJ/(kg·K). Iki kokios temperatūros įšils tirpalas ?

3.10. Kondensatoriuje, kuriame palaikomas atmosferinis slėgis, kondensuojami 850 kg/h sausi sotieji anglies sulfido garai. Į kondensatorių įtekančių garų temperatūra 90 °C, o ištekančio kondensato 8 °C žemesnė už kondensacijos temperatūrą. Garų savitoji šiluma c = 0,67 kJ/(kg·K). Apskaičiuoti C_2S atiduodamą šilumos srautą.

3.11. Kaip pasikeis 3 mm sienelės storio plieninių vamzdžių šilumos perdavimo koeficiento K vertė, kai ant jų paviršiaus susidarys 2 mm storio nuovirų sluoksnis, jei: a) šilumokaityje vandeniu (α_v = 580 W/(m^2·K)) aušinamos dujos, kurių α_d = 58 W/(m^2·K) ir; b) garintuve vandens garais ($\alpha_{š.g}$ = 11600 W/(m^2·K)) garinamas tirpalas (α_t = 2780 W/(m^2·K)).

3.12. Apskaičiuoti šilumos srauto tankį garintuvo šildymo kameroje, jei garintuve toluenas garinamas, esant atmosferiniam slėgiui. Garintuvo 4 mm sienelės storio plieniniai vamzdžiai iš abiejų pusių padengti 0,6 mm storio rūdžių sluoksniu. Šildoma sočiaisiais vandens garais, kurių manometrinis slėgis p_m = 3,0 kgf/cm^2, drėgnis x = 8 %. Šiluminių varžų iš abiejų vamzdžio sienelės pusių nevertinti. Skaičiuoti pagal plokščios sienelės lygtį.

3.13. Iš garintuvo ištekantis koncentruotas 106 °C temperatūros tirpalas panaudojamas į garintuvą tiekiamam tirpalui pašildyti vienos ėjos šilumokaityje nuo 15 °C iki 50 °C. Iš šilumokaičio išteka 60 °C temperatūros koncentruotas tirpalas. Apskaičiuoti vidutinį temperatūrų skirtumą tarp fluidų jiems judant pagal pasrovę ir priešsrovę schemas.

3.14. Apskaičiuoti priešpriešinio šilumokaičio reikalingą šilumos mainų paviršiaus plotą, jei šilumokaityje 1930 kg/h butilo alkoholio ataušinama nuo 90 °C iki 50 °C temperatūros. Įtekančio į šilumokaitį aušinančio vandens temperatūra 18 °C, jo debitas 4,21 m^3/h. Šilumos perdavimo koeficientas K = 700 W/(m^2·K).

3.15. Šilumokaitis sudarytas iš 19 bronzinių vamzdžių, kurių skersmuo (18×2) mm ir ilgis 1,2 m. Ar tiks šis šilumokaitis sukondensuoti 350 kg/h sočiųjų etanolio garų, jei šilumos perdavimo koeficientas K = 700 W/(m^2·K), įtekančio į šilumokaitį vandens temperatūra 15 °C, ištekančio iš jo 35 °C? Kondensacija vyksta, esant atmosferiniam slėgiui, ir kondensatas papildomai neaušinamas.

3.16. Apskaičiuoti 48 m^2 šilumos mainų paviršiaus šilumokaičio šilumos perdavimo koeficientą K, jei šilumokaityje sausais sočiaisiais vandens garais, kurių p_m = 230 kPa, šildomas 85,5 t/h vanduo nuo 77 °C iki 95 °C.

3.17. Apskaičiuoti priešpriešinio šilumokaičio šilumos perdavimo paviršiaus plotą ir aušinančio vandens sąnaudas, jei šilumokaityje aušinama 0,85 m^3/h anglies sulfido nuo virimo temperatūros (esant atmosferiniam slėgiui) iki 22 °C. Aušinantis vanduo įšyla nuo 14 °C iki 25 °C. Šilumos atidavimo koeficientai: nuo C_2S sienelei α_l = 270 W/(m^2·K) ir nuo sienelės vandeniui

$\alpha_2 = 720$ W/(m^2·K). Plieninė 3 mm storio sienelė padengta nuovirų sluoksniu, kurio terminė varža $\Sigma r_t = 0{,}69 \cdot 10^{-3}$ (m^2·K)/W.

3.18. Apskaičiuoti šilumos atidavimo koeficientą vienos ėjos šilumokaičio vamzdinėje ertmėje, jei šilumokaitį sudaro 19 vamzdžių, kurių skersmuo (16×2) mm. Vamzdžiais teka 3,7 t/h metilo alkoholis, kuris įšyla nuo 10 °C iki 50 °C. Vamzdžių vidinio paviršiaus temperatūra 60 °C.

3.19. Vamzdinio korpusinio šilumokaičio tarpvamzdėje ertmėje lygiagrečiai vamzdžių pluošto ašiai 4,6 m/s greičiu teka metanas, esant pertekliniam jo slėgiui 5 kgf/cm^2 ir vidutinei temperatūrai 75 °C. Apskaičiuoti metano šilumos atidavimo išoriniam vamzdžių paviršiui koeficientą, jei šilumokaičio korpuso, kurio vidinis skersmuo 190 mm, vidinėje ertmėje yra išdėstyti 37 plieniniai (16×2) mm skersmens vamzdžiai.

3.20. Apskaičiuoti vandens šilumos atidavimo (46×3) mm skersmens vamzdžio vidinei sienelei koeficientą, jei sienelės paviršiaus vidutinė temperatūra 90 °C, vandens tekėjimo greitis 0,70 m/s, vidutinė vandens temperatūra 46 °C.

3.21. Apskaičiuoti anglies tetrachlorido šilumos atidavimo koeficientą, jei jis teka horizontalaus vamzdinio korpusinio šilumokaičio vamzdinėje ertmėje. Vidutinė CCl_4 temperatūra 26 °C, tekėjimo greitis 0,15 m/s. (25×2) mm skersmens vamzdžio vidinio paviršiaus vidutinė temperatūra 34 °C.

3.22. Vertikalių 4,0 m aukščio vamzdžių viduje, esant atmosferiniam slėgiui, verda toluenas. Apskaičiuoti tolueno šilumos atidavimo koeficientą, kai vamzdžių vidinio paviršiaus temperatūra 125,3 °C.

3.23. Vienos ėjos vamzdinio korpusinio šilumokaičio vamzdžiuose 81 t/h gryno metileno pašildoma nuo 15 °C iki 42 °C temperatūros. Tarpvamzdėje ertmėje priešpriešiniu būdu juda karštas šildantysis vanduo, kuris atvėsta nuo 90 °C iki 40 °C. Vandens šilumos atidavimo išoriniam vamzdžių paviršiui koeficientas α = 840 W/(m^2·K). Suminis sienelės ir nuovirų šilumos laidumas 1700 W/(m^2·K); vidutinė vamzdžių vidinio paviršiaus temperatūra 40 °C. Vamzdžių skaičius 110, jų vidinis skersmuo 21 mm. Apskaičiuoti reikalingą šilumos atidavimo paviršiaus plotą.

3.24. Apskaičiuoti reikalingą šilumos atidavimo paviršiaus plotą vienos ėjos vamzdiniame korpusiniame priešsroviame šilumokaityje. Vamzdžių skaičius šilumokaityje 200, jų vidinis skersmuo 34 mm. Vamzdžių viduje, esant 850 mm Hg absoliučiajam slėgiui, oras šildomas nuo 20 °C iki 90 °C temperatūros. Oro debitas $7{,}77 \cdot 10^3$ m^3/h (skaičiuotas normaliomis sąlygomis). Tarpvamzdėje ertmėje kondensuojasi sotieji vandens garai, jų absoliutusis slėgis 2 kgf/cm^2. Garų šilumos atidavimo išoriniam vamzdžių paviršiui koeficientas $\alpha = 10^4$ W/(m^2·K). Suminis sienelės ir nuovirų sluoksnio šilumos laidumas 1,2 kW/(m^2·K).

3.25. Apskaičiuoti reikalingą vamzdžių ilgį ir šildančiųjų sočiųjų vandens garų (drėgnis 6 %) sąnaudas vienos ėjos vamzdiniame korpusiniame šilumokaityje. Vamzdžių skaičius 110, jų skersmuo (38×2) mm. Vamzdžiuose 5200 m^3/h (skaičiuotas normaliomis sąlygomis) debitu atmosferinio slėgio oras šildomas nuo 20 °C iki 90 °C temperatūros. Sočiųjų vandens garų absoliutusis slėgis 2 kgf/cm^2. Šilumos perdavimo koeficientą prilyginti oro šilumos atidavimo koeficientui.

3.26. Gyvatuko vamzdelyje aušinama 1,5 t/h tolueno nuo 90 °C iki 30 °C temperatūros. Aušinama vandeniu, tekančiu priešinga toluenui kryptimi. Vanduo įšyla nuo 15 °C iki 40 °C. Gyvatuko vamzdelis plieninis, vamzdelio skersmuo (57×3,5) mm, gyvatuko skersmuo 0,4 m. Sienelės šilumos atidavimo toluenui koeficientas 580 $W/(m^2 \cdot K)$. Apskaičiuoti reikalingą gyvatuko vamzdelio ilgį ir aušinančio vandens sąnaudas, kai vamzdelio sienelės ir nuovirų sluoksnio ant jos suminė šiluminė varža lygi $0{,}7 \cdot 10^{-3}$ $(m^2 \cdot K)/W$, o vidinio nuovirų sluoksnio temperatūra 42 °C.

3.27. Apskaičiuoti reikalingą šilumokaičio *vamzdis vamzdyje* ilgį ir aušinančio vandens sąnaudas. Vamzdžių skersmenys atitinkamai (89×5) mm ir (44,5×3,5) mm. Šilumokaičio tarpvamzdėje ertmėje pasroviu būdu 1930 kg/h debitu aušinamas toluenas nuo 70 °C iki 30 °C temperatūros. Vanduo teka vidiniu vamzdžiu, jis įšyla nuo 14 °C iki 21 °C. Vidutinė nuovirų paviršiaus (nuo vandens pusės) temperatūra 20 °C.

3.28. Plieninis aparatas, kurio išorinio paviršiaus temperatūra 500 °C, padengtas 125 mm storio keraminių plytų sluoksniu ir papildomu šiluminės izoliacijos sluoksniu. Sluoksnių šilumos laidumo koeficientai atitinkamai lygūs 0,68 W/(m·K) ir 0,12 W/(m·K). Apskaičiuoti reikalingą šiluminės izoliacijos sluoksnio storį, kad jos išorinio paviršiaus temperatūra nebūtų didesnė kaip 50 °C, esant aplinkos oro temperatūrai 25 °C.

4 dalis. GARINIMAS

Tirpalų koncentravimas, virinimo būdu išgarinant dalį tirpiklio ir pašalinant garus, vadinamas garinimu. Mažėjant tirpiklio kiekiui tirpale, tirpalo koncentracija didėja tol, kol tomis sąlygomis susidaro sotusis bei persotintasis tirpalas. Temperatūrose, žemesnėse už tirpiklio virimo temperatūrą, tirpiklis garuoja tik nuo tirpalo paviršiaus, o tirpalui verdant tirpiklis garuoja visame verdančio tirpalo tūryje, todėl yra intensyviau pašalinamas iš tirpalo. Dėl to realūs technologiniai procesai atliekami tirpalų virimo temperatūroje.

4.1. Pagrindiniai dėsningumai ir skaičiavimų lygtys

1. Garinimo proceso medžiagų balanso lygtys

Garinimo procese dalyvaujančių medžiagų balanso lygtis gali būti užrašoma taip:

$$G_1 = G_2 + W; \tag{4.1}$$

$$G_1 \cdot a_1 = G_2 \cdot a_2; \tag{4.2}$$

čia G_1 – garinimui tiekiamo tirpalo kiekis, kg/s; G_2 – po garinimo gauto koncentruoto tirpalo kiekis, kg/s; W – išgarinto tirpiklio kiekis, kg/s, a_1 – tirpalo koncentracija iki garinimo, masės dalimis ($kg_{ištirpusios\ medžiagos}/kg_{tirpalo}$); a_2 – tirpalo koncentracija po garinimo, masės dalimis.

Pagal vieną iš balanso lygčių galima apskaičiuoti koncentruoto tirpalo arba išgarinto tirpiklio kiekius:

$$G_2 = G_1 \cdot a_1/a_2. \tag{4.3}$$

$$W = G_1 - G_2 = G_1(1 - a_1/a_2) = G_2(a_2/a_1 - 1). \tag{4.4}$$

2. Garinimo proceso šilumos balanso lygtys

Vienas iš pagrindinių garinimo proceso uždavinių yra tirpalo virimo temperatūros nustatymas.

Garinamo tirpalo virimo temperatūra apskaičiuojama, įvertinant bendrus virimo temperatūros nuostolius:

$$t_v = t_W + \Delta; \tag{4.5}$$

čia t_w – gryno tirpiklio virimo temperatūra, esant garinimo slėgiui, °C; Δ – bendroji tirpalo depresija – virimo temperatūros nuostoliai, °C.

Temperatūros nuostoliai Δ susidaro dėl fizikinės cheminės Δ_1, hidrostatinės Δ_2 ir hidraulinės Δ_3 depresijų:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3. \tag{4.6}$$

Fizikinė cheminė depresija Δ_1 apskaičiuojama;

$$\Delta_1 = t_t - t_w; \tag{4.7}$$

čia t_t – teorinė tirpalo virimo temperatūra, esant garinimo slėgiui, °C; t_w– gryno tirpiklio virimo temperatūra, esant garinimo slėgiui, °C.

Garinant atmosferiniame slėgyje vandeninius tirpalus, ši depresija apskaičiuojama taip:

$$\Delta_{1,at} = t_{t,at} - t_{w,at} = t_{t,at} - 100\ °C. \quad (4.8)$$

Jei garinama, palaikant vakuumą arba viršslėgį, temperatūrę depresiją $\Delta_{1,at}$ reikia perskaičiuoti, pasinaudojus apytiksle Tiščenkos lygtimi:

$$\Delta_1 = 16{,}2 \cdot \frac{T^2}{r} \cdot \Delta_{1,at}; \quad (4.9)$$

čia T – vandens virimo temperatūra, K (XIII lentelė); r – antrinių sočiųjų vandens garų susidarymo šiluma, J/kg, esant garintuve darbiniam slėgiui.

Hidrostatinė depresija

Garintuve apatinių tirpalo sluoksnių garai kildami aukštyn turi nugalėti viršutinių sluoksnių sudaromą hidrostatinį slėgį, todėl apatiniai tirpalo sluoksniai užverda, esant (1–3) °C aukštesnei temperatūrai negu viršutiniai. Kadangi tirpalo virimo temperatūra kinta pagal šildymo kameros vamzdžių aukštį, tai paprastai vidutinė tirpalo virimo temperatūra skaičiuojama šių vamzdžių viduriniame skerspjūvyje.

Šiame skerspjūvyje susidarantis slėgis p_v, Pa, apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$p_v = p_{II} + 0{,}5\ \rho_t g\ H_l = p_{II} + \Delta p_{h.e}; \quad (4.10)$$

čia p_{II} – slėgis virš verdančio tirpalo separatoriuje, Pa; ρ_t – tirpalo vidutinis tankis, kg/m^3; H_l – garinamo tirpalo sluoksnio aukštis, m; $\Delta p_{h.e}$ – hidrostatinis efektas, t. y. tirpalo sluoksnio sudaromas hidrostatinis slėgis, Pa.

Optimalus nugarinamų vandeninių tirpalų lygio aukštis H_l, m, garintuvuose, kai tirpalas natūraliai cirkuliuoja, apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$H_l = [0{,}26 + 0{,}0014\ (\rho_t - \rho_v)]H_d; \quad (4.11)$$

čia ρ_t ir ρ_v – koncentruoto tirpalo (III lentelė) ir vandens vidutiniai tankiai, esant virimo temperatūrai, kg/m^3; H_d – šildymo kameros vamzdžių aukštis, m.

Viduriniame verdančio tirpalo sluoksnio aukštyje susidaranti hidrostatinė depresija Δ_2 apskaičiuojama pagal lygtį:

$$\Delta_2 = t_v - t_{gII}; \quad (4.12)$$

čia t_v – vandens virimo temperatūra, esant slėgiui p_v viduriniame verdančio tirpalo sluoksnyje; t_{gII} – antrinių sočiųjų garų temperatūra virš verdančio tirpalo.

Hidraulinė depresija

Hidraulinė depresija Δ_3 įvertina antrinių sočiųjų garų temperatūros pasikeitimą, pratekėjus garams per vamzdžius, jungiančius garintuvą su kondensatoriumi. Slėgis separatoriuje p_{II}, Pa apskaičiuojamas taip:

$$p_I = p_b + \Delta p_n; \quad (4.13)$$

čia p_b – absoliutus slėgis barometriniame kondensatoriuje, Pa; Δp_n – suminiai antrinių garų slėgio nuostoliai dėl trinties bei vietinių kliūčių vamzdyne, Pa.

$$\Delta p_n = (1 + \frac{\xi \cdot L}{d} + \Sigma\zeta) \cdot \frac{w^2 \cdot \rho_g}{2} = (p_{II} - p_b);$$

čia ξ – trinties koeficientas; L – vamzdyno ilgis, m; d – vamzdžio vidinis skersmuo, m; w – garų greitis, m/s; ρ_g – garų tankis, kg/m^3; $\Sigma\zeta$ – visų vamzdyne esančių vietinių kliūčių koeficientų ζ_i suma.

Apskaičiavus suminius slėgio nuostolius bei žinant slėgį garintuvo separatoriuje, nustatomos tirpiklio garų soties temperatūros t_{II} bei t_b, esant slėgiams p_{II} bei p_b. Tada hidraulinė depresija:

$$\Delta_3 = t_{II} - t_b . \qquad (4.14)$$

Dažniausiai ši depresija yra nedidelė ir būna (0,5–1,5) °C.

Bendra garinimo proceso šilumos srautų balanso lygtis:

$$Q + G_1 \cdot c_1 \cdot t_1 = G_2 \cdot c_2 \cdot t_2 + W \cdot h \pm Q_{deh} + Q_n ; \qquad (4.15)$$

čia Q – šildymo garų atiduotos šilumos srautas, W; c_1 ir c_2 – įtekančio ir ištekančio tirpalo savitosios šilumos, J/(kg·K); t_1 ir t_2 – tirpalo, įtekančio į garintuvą ir ištekančio iš jo, temperatūros, °C; h – antrinių garų entalpija, J/kg; $G_1 \cdot c_1 \cdot t_1$ – su įtekančiu tirpalu gautas šilumos srautas, W; $G_2 \cdot c_2 \cdot t_2$ – su koncentruotu tirpalu iš garintuvo pašalinamas šilumos srautas, W; $W \cdot h$ – su antriniais garais iš tirpalo pašalinamas šilumos srautas, W; $\pm Q_{deh}$ – dehidratacijai sunaudotas (arba išsiskyręs) šilumos srautas, W; Q_n – šilumos nuostoliai, W.

Garinimui reikalingos šilumos srautas apskaičiuojamas:

$$Q = G_1 \cdot c_1 (t_2 - t_1) + W \cdot (h - c_w t_2) + Q_n \pm Q_{deh} ; \qquad (4.16)$$

čia c_w – vandens savitoji šiluma, esant galutinei tirpalo temperatūrai t_2, J/(kg·K); h – antrinių sočiųjų vandens garų entalpija, esant garinimo slėgiui p_s, J/kg; $Q_{paš} = G_1 \cdot c_1 \cdot (t_2 - t_1)$ – šilumos srautas, reikalingas tirpalui pašildyti iki virimo temperatūros t_2, W; $Q_{t.\ išg.} = W \cdot (h - c_w \cdot t_2)$ – šilumos srautas, kurio reikia išgarinti tirpiklį (vandenį), esant virimo temperatūrai t_2, W; Q_n – garinimo šilumos nuostoliai į aplinką, W; $\pm Q_{deh}$ – druskos dehidratacijos šilumos srautas, W.

Tirpalo savitoji šiluma skaičiuojama pagal bendrą adityvumo principą:

$$c = c_1 \cdot a_1 + c_2 \cdot a_2 + \ldots + c_n \cdot a_n ; \qquad (4.17)$$

čia $c_1, c_2, \ldots, c_n$ – atskirų tirpalo komponentų savitosios šilumos, J/(kg·K); $a_1, a_2, \ldots, a_n$ – komponentų koncentracijos, masės dalimis.

Praskiestų ($a < 0,2$) dvikomponenčių (vanduo + ištirpinta medžiaga) tirpalų savitoji šiluma gali būti apskaičiuojama pagal lygtį:

$$c = 4190 \cdot (1 - a_1) ; \quad (4.18)$$

čia 4190 – vandens savitoji šiluma, J/(kg·K); a_1 – ištirpintos medžiagos koncentracija tirpale masės dalimis.

Koncentruotų dvikomponenčių vandeninių tirpalų ($a > 0,2$) savitoji šiluma apskaičiuojama pagal lygtį:

$$c = 4190 \cdot (1 - a_1) + c_M a_1 ; \quad (4.19)$$

čia c_M – bevandenės ištirpintos medžiagos savitoji šiluma, J/(kg·K).

Garinimo proceso metu susidarę šilumos nuostoliai į aplinką Q_n, W, apskaičiuojami pagal lygtį:

$$Q_n = \alpha \cdot F_{iš} \cdot (t_p - t_{oro}); \quad (4.20)$$

čia α – suminis šilumos atidavimo nuo garintuvo paviršiaus į aplinką spinduliavimu ir konvekcija koeficientas ($\alpha = \alpha_{sp} + \alpha_k$), W/(m^2·K); $F_{iš}$ – išorinis garintuvo paviršiaus plotas, m^2; t_p – išorinio paviršiaus temperatūra, °C; t_{oro} – aplinkos oro temperatūra, °C.

Dažniausiai garinimo įrenginių šiluminiuose skaičiavimuose Q_n nusakomi procentais nuo naudingai sunaudoto šilumos kiekio (pvz., 3–5 % ribose).

Ištirpintos medžiagos dehidratacijos šiluma Q_{deh} apskaičiuojama iš techninių žinynų lentelių, pirmiausia nustačius vieno molio ištirpintos medžiagos susidarymui sunaudotos (arba išsiskyrusios) šilumos kiekį, kJ/mol (žr. 4.9. Pvz.). Paprastai ši šiluma, lyginant su kitais šilumos balanso nariais, yra nežymi ir techniniuose skaičiavimuose į ją galima nekreipti dėmesio.

Šildymo garų sąnaudos priklauso nuo tiekiamų sočiųjų garų slėgio ir iš šildymo kameros ištekančio kondensato temperatūros.

Iš šildymo garų gaunama šiluma Q bendruoju atveju susideda iš dviejų dalių:

1) sočiųjų garų kondensacijos proceso metu išsiskyrusios šilumos Q_k;

2) šildymo kameros vamzdžiais tekančio kondensato fizikinės aušimo šilumos $Q_{k.a}$:

$$Q = Q_k + Q_{k.a} . \quad (4.21)$$

Sočiųjų garų kondensacijos proceso metu išsiskyrusios šilumos srautas apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$Q_k = D \cdot r \cdot (1 - x) ; \quad (4.22)$$

čia D – garinimui reikalingos šildymo sočiųjų garų sąnaudos, kg/s; r – sočiųjų garų susidarymo šiluma, J/kg, parenkama iš lentelių pagal garų absoliutųjį slėgį; x – sočiųjų garų drėgnumo laipsnis, t. y. sočiųjų vandens garų, esančių smulkių verdančio vandens lašelių būklėje, dalis.

Kondensacijos metu susidariusio skysto kondensato fizikinės aušimo šilumos srautas apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$Q_{k.a.} = D_k \cdot c_k \cdot (t_{k.\,pr} - t_{k.\,g}) \; ; \qquad (4.23)$$

čia D_k – kondensacijos metu iš sočiųjų šildymo garų susidariusio kondensato kiekis, kg/s, ($D_k = D$); $t_{k.pr}$ – pradinė susidariusio kondensato temperatūra, °C (ši temperatūra yra lygi garų soties temperatūrai, t. y. $t_{k.pr} = t_s = t_{gI}$ ir parenkama iš XIII lentelės pagal šildymo sočiųjų garų absoliutųjį slėgį); $t_{k.g}$ – iš garintuvo ištekančio kondensato temperatūra, °C; c_k – kondensato vidutinė savitoji šiluma, J/(kg·K), temperatūrų intervale $t_{k.pr} - t_{k.g.}$, esant $t_{k,vid} = (t_{k.\,pr.} + t_{k.\,g.})/2$.

Savitosios šildančių garų sąnaudos d, $kg_{garų}/kg_{tirpiklio}$, apskaičiuojamos pagal lygtį:

$$d = \frac{D}{W} . \qquad (4.24)$$

Temperatūrų skirtumas tarp šildymo garų kondensacijos temperatūros garintuvo šildymo kameroje t_{gI} ir antrinių garų kondensacijos temperatūros barometriniame kondensatoriuje t_{gIIk} (kuri surandama XVII lentelėje pagal absoliutųjį sočiųjų vandens garų slėgį barometriniame kondensatoriuje) yra *vadinamas bendruoju garintuvo temperatūrų skirtumu*:

$$\Delta t_b = t_{g\,I} - t_{gIIk} \; . \qquad (4.25)$$

Temperatūrų skirtumas tarp šildymo garų kondensacijos temperatūros t_{gI} ir tirpalo virimo temperatūros t_v yra vadinamas *naudinguoju temperatūrų skirtumu*:

$$\Delta t_n = t_{gI} - t_v = t_{gI} - t_{gII} - \Delta \; . \qquad (4.26)$$

Reikalingas garintuvo šilumos mainų paviršiaus plotas F, m^2, apskaičiuojamas pagal bendrą šilumos perdavimo šilumokaičiuose išraišką

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t_{vid};$$

tačiau *garintuvuose vidutinė šilumos perdavimo varančioji jėga prilyginama naudinguojam temperatūrų skirtumui* Δt_n:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_n} ; \qquad (4.27)$$

čia Q – bendrasis iš sočiųjų šildymo garų kondensacijos gaunamas šilumos srautas, W; K – garintuvo šildymo kameros šilumos perdavimo koeficientas, $W/(m^2 \cdot K)$.

Garintuvų sistemos *bendrasis temperatūrų skirtumas* Δt_b apskaičiuojamas kaip skirtumas tarp pirmo garintuvo šildymo garų kondensacijos temperatūros ir antrinių garų kondensacijos temperatūros paskutiniame garintuve. Skaičiuodami

bendrą tirpalo depresiją Δ tam tikrame korpuso garintuve, sumuojame bendras depresijas (temperatūrinę, hidrostatinę ir hidraulinę) visų iki jo esančių garintuvų bei skaičiuojamo garintuvo.

4.2. Uždavinių sprendimo pavyzdžiai

4.1. Pvz. Apskaičiuoti 8,5 % (**visuose uždavinių sprendimo pavyzdžiuose ir kontroliniuose uždaviniuose koncentracijos išreiškiamos *masės procentais*)** koncentracijos $MgCl_2$ tirpalo fizikines chemines depresijas Δ_1, jei garinama įrenginyje, kuriame: a) atmosferinis slėgis; b) 120 mm Hg vakuuminis slėgis.

S p r e n d i m a s. a) kai slėgis atmosferinis, tirpalų virimo temperatūros parenkamos iš priedų XIV lentelės. 8,5 % koncentracijos $MgCl_2$ virimo temperatūra $t_{t,at} = 102$ °C. Tirpalo fizikinė cheminė depresija apskaičiuojama:

$$\Delta_{l,at} = t_{t,at} - 100 = 102 - 100 = 2 \text{ °C};$$

b) kai garinama įrenginyje palaikant vakuumą, tai nustatytą $\Delta_{l,at}$ reikia perskaičiuoti, pasinaudojus Tiščenkos lygtimi (4.9).

Vandens virimo temperatūrą T parenkame iš XVII lentelės pagal garinimo įrenginyje esantį slėgį

$$p_{abs} = 760 \cdot 133{,}3 - 120 \cdot 133{,}3 = 85312 \text{ Pa} = 85 \text{ kPa}.$$

Šiame slėgyje vandens virimo temperatūra $T = 95 + 273 = 368$ K.

Antrinių vandens garų susidarymo šilumą r parenkame iš tos pačios XVII lentelės, kai garinimo slėgis 85 kPa ($r = 2273 \cdot 10^3$ J/kg). Tada temperatūros depresija Δ_1:

$$\Delta_1 = 16{,}2 \cdot \frac{(368)^2}{2273 \cdot 10^3} \cdot 2 = 1{,}93 \text{ °C}.$$

4.2. Pvz. Nustatyti hidrostatinės depresijos dydį, garinant 25 % $CaCl_2$ tirpalą, jei garintuvo separatoriuje yra palaikomas 0,40 kgf/cm^2 absoliutusis slėgis. Šildymo kameros vamzdžių aukštis $H_d = 4{,}0$ m.

S p r e n d i m a s. Hidrostatinė depresija apskaičiuojama pagal (4.12) lygtį:

$$\Delta_2 = t_v - t_{gII}.$$

Antrinių sočiųjų vandens garų temperatūra parenkama XVII lentelėje, esant absoliučiajam slėgiui $p_{II} = 0{,}40$ kgf/cm^2 $= 0{,}40 \cdot 9{,}81 \cdot 10^4$ Pa $= 39240$ Pa:

$$t_{gII} = 75{,}4 \text{ °C}.$$

Vandens virimo temperatūra t_v parenkama iš tos pačios XVII lentelės, esant vidurinio sluoksnio slėgiui p_v, kuris apskaičiuojamas pagal (4.10) lygtį:

$p_v = p_{II} + 0{,}5 \cdot \rho_t \cdot g \cdot H_l$.

Optimalus garinamo tirpalo sluoksnio aukštis lygio matavimo vamzdelyje H_l apskaičiuojamas pagal (4.11) lygtį:

$H_l = [0{,}26 + 0{,}0014 \cdot (\rho_t - \rho_{H2O})]\, H_d$.

Kadangi tirpalo virimo temperatūra nežinoma, tai imame, kad tirpalo ir vandens tankių skirtumas·$(\rho_t - \rho_{H2O})$, esant virimo temperatūrai, yra apytiksliai lygūs šių tankių skirtumui, esant kambario temperatūrai. 25 % koncentracijos $CaCl_2$ tirpalo tankio vertę, esant 20 °C temperatūrai, parenkame iš III lentelės: $\rho_t = 1230$ kg/m^3. 20 °C temperatūros vandens tankio vertė $\rho_{H_2O} = 998$ kg/m^3. Šildymo kameros vamzdžių aukštis $H_d = 4{,}0$ m. Apskaičiuojame optimalų garinamo tirpalo sluoksnio aukštį H_l:

$H_l = [0{,}26 + 0{,}0014 \cdot (1230 - 998)] \cdot 4{,}0 = 2{,}339 \text{ m} \approx 2{,}34 \text{ m}$.

Pagal (4.10) lygtį galime apskaičiuoti verdančio skysčio slėgį viduriniame sluoksnyje:

$p_v = 39240 + 0{,}5 \cdot 1230 \cdot 9{,}81 \cdot 2{,}34 = 53358$ Pa.

Esant šiam absoliučiajam slėgiui, iš priedų XVII lentelės parenkama vandens virimo temperatūra $t_v = 82{,}92$ °C.

Hidrostatinės depresijos vertė apskaičiuojama:

$\Delta_2 = t_v - t_{gII} = 83 - 75{,}4 = 7{,}6$ °C.

Tikriname optimalų garinamo tirpalo sluoksnio aukštį H_l ir hidrostatinės depresijos dydį, kai tirpalo ir vandens tankių vertės yra virimo temperatūros:

$\rho_t = 1198{,}5$ kg/m^3; $\rho_{H_2O} = 970$ kg/m^3;

$H_l = [0{,}26 + 0{,}0014 \cdot (1198{,}5 - 970)] \cdot 4{,}0 = 2{,}32$ m.

Kadangi gauta H_l vertė labai artima apskaičiuotai pirmuoju atveju (2,34 m), tai ir hidrostatinės depresijos vertė praktiškai nesikeičia.

4.3. Pvz. Apskaičiuoti hidraulinės depresijos dydį, jei antriniai vandens garai iš garintuvo į barometrinį kondensatorių tiekiami 14 m ilgio ir 150 mm skersmens vamzdžiu, kuriame yra trys 90° alkūnės ($\zeta = 0{,}2$). Kondensatoriuje palaikomas 0,3 kgf/cm^2 absoliutusis slėgis. Garų greitis vamzdyje 50 m/s, trinties koeficientas $\xi = 0{,}03$.

S p r e n d i m a s. Suminiai slėgio nuostoliai dėl vamzdyno vietinių kliūčių ir trinties apskaičiuojami pagal lygtį:

$$\Delta p_n = \left(1 + \frac{\xi \cdot L}{d} + \sum \zeta\right) \cdot w^2 \cdot \rho_g / 2 .$$

Vamzdyne, be nurodytų trijų alkūnių, yra dar dvi papildomos vietinės kliūtys: garų srauto įtekėjimas iš garintuvo į vamzdyną ($\zeta = 0,5$) ir ištekėjimas iš jo į kondensatorių ($\zeta = 1,0$, VII lentelė). Garų tankį ρ_g parenkame iš XVII lentelės, esant p_{abs} = 0,3 kgf/cm^2 = 0,3·9,8·10^4 = 29430 Pa. Esant šiam slėgiui, t_g = 68,7 °C ir ρ_g = 0,188 kgf/cm^2.

Apskaičiuojame suminius slėgio nuostolius:

$$\Delta p_n = (1 + \frac{0,03 \cdot 14}{0,15} + 0,5 + 3 \cdot 0,2 + 1,0) \cdot 50^2 \cdot 0,188 / 2 = 1390 \text{ Pa}.$$

Slėgis garintuvo separatoriuje:

$p_{gII} = p_b + \Delta p_n = 29430 + 1390 = 30820$ Pa.

Esant šiam slėgiui, antrinių sočiųjų garų temperatūra t_g = 69,6 °C (XVII lentelė). Tada hidraulinė depresija:

$\Delta_3 = t_{gII} - t_b = 69,6 - 68,7 = 0,9$ °C.

4.4. Pvz. Apskaičiuoti 17 % KOH tirpalo virimo temperatūrą, jei tirpalas garinamas: a) kai garintuve virš tirpalo atmosferinis slėgis; b) 0,2 kgf/cm^2 vakuumas; c) 4 kgf/cm^2 viršslėgis.

S p r e n d i m a s. a) KOH tirpalo virimo temperatūrą t_v apskaičiuojame pagal lygtį $t_v = t_w + \Delta$.

Bendrąją depresiją Δ apskaičiuojame pagal lygtį $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3$.

Fizikinę cheminę depresija, esant atmosferiniam slėgiui, apskaičiuojama:

$$\Delta_{atm} = t_{v,atm} - 100 = 105 - 100 = 5 \text{ °C};$$

čia $t_{v,atm}$ – 17 % KOH tirpalo virimo temperatūra, esant atmosferiniam slėgiui, parenkame iš VIII lentelės $t_{v,atm}$ = 105 °C.

Priėmus, kad hidrostatinė depresija Δ_2 = 2 °C; o hidraulinė depresija Δ_3 = 1 °C, bendroji tirpalo virimo temperatūros depresija:

$\Delta = 5 + 2 + 1 = 8$ °C.

Tirpalo virimo temperatūra, esant atmosferiniam slėgiui:

$t_v = 100 + 8 = 108$ °C.

b) Apskaičiuojame Δ_1, esant 0,2 kgf/cm^2 vakuumui (žr. 4.1. Pvz.)

$p_{abs} = 760 \cdot 133,3 - 0,2 \cdot 9,8 \cdot 10^4 = 81688$ Pa

Iš XVII lentelės pagal p_{abs} = 81688 Pa (0,83 at), t_w = 94 °C ir r = 2276000 J/kg.

$$\Delta_1 = 16{,}2 \cdot \frac{(367)^2}{2276 \cdot 10^3} \cdot 5 = 4{,}79 \ ^\circ\text{C}.$$

Bendroji tirpalo virimo temperatūros depresija:

$$\Delta = 4{,}79 + 2 + 1 = 7{,}79 \approx 7{,}8 \ ^\circ\text{C}.$$

Tirpalo virimo temperatūra, esant 0,2 kgf/cm^2 vakuumui:

$$t_v = 94 + 7{,}8 = 101{,}8 \ ^\circ\text{C}.$$

c) Norėdami apskaičiuoti tirpalo virimo temperatūrą, esant 4 kgf/cm^2 viršslėgiui, perskaičiuojame p_{abs}, T ir Δ_1 vertes:

$$p_{abs} = 760 \cdot 133{,}3 + 4 \cdot 9{,}8 \cdot 10^4 = 493708 \ \text{Pa}.$$

Pagal šį slėgį iš XVII lentelės parenkame $t_w = 151{,}2$ °C ir $r = 2110000$ J/kg:

$$T = 273 + 151{,}2 = 424{,}2 \ ^\circ\text{C};$$

$$\Delta_1 = 16{,}2 \cdot \frac{(424{,}2)^2}{2110 \cdot 10^3} \cdot 5 = 6{,}91 \ ^\circ\text{C}.$$

Tirpalo virimo temperatūra, esant 4 kgf/cm^2 viršslėgiui:

$$t_v = 151{,}2 + 6{,}91 + 2 + 1 = 161{,}1 \ ^\circ\text{C}.$$

4.5. Pvz. Apskaičiuoti naudingą temperatūrų skirtumą garintuve, jei garinamas 14,3 % koncentracijos KCl tirpalas, esant 0,7 kgf/cm^2 absoliučiajam slėgiui. Šildymo sočiųjų vandens garų viršslėgis lygus 2,0 kgf/cm^2.

S p r e n d i m a s. Naudingas temperatūrų skirtumas apskaičiuojamas pagal lygtį $t_n = t_{gI} - t_{gII} - \Delta$.

Šildymo garų soties temperatūra t_{gI} parenkama iš XVII lentelės, esant $p_{abs} = 760 \cdot 133{,}3 + 2{,}0 \cdot 9{,}81\ 10^4 = 297508$ Pa; $t_{gI} = 133$ °C.

Iš garinamo KCl tirpalo susidariusių antrinių sočiųjų vandens garų temperatūrą t_{gII} parenkame XVII lentelėje, esant $p_{abs} = 0{,}7 \cdot 9{,}81 \cdot 10^4$ Pa; $t_{gII} = 89{,}3$ °C. Bendroji garinamo tirpalo depresija apskaičiuojama:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3;$$

$$\Delta_{1at} = \Delta_{t\,at} - 100 = 102 - 100 = 2 \ ^\circ\text{C}.$$

Antrinių garų temperatūrą T ir sočiųjų garų susidarymo šilumą r parenkame XVII lentelėje pagal $p_{absII} = 68670$ Pa; $T = 273 + 89{,}3 = 362{,}3$ K; $r = 2286 \cdot 10^3$ J/kg. Tada fizikinė cheminė depresija:

$$\Delta_1 = 16{,}2 \cdot [(363{,}3)^2/(2286 \cdot 10^3)] \cdot 2 = 1{,}86 \ ^\circ\text{C}.$$

Priėmus, kad hidrostatinė depresija Δ_2 = 2 °C; hidraulinė depresija Δ_3 = 1,0 °C, bendroji depresija apskaičiuojama:

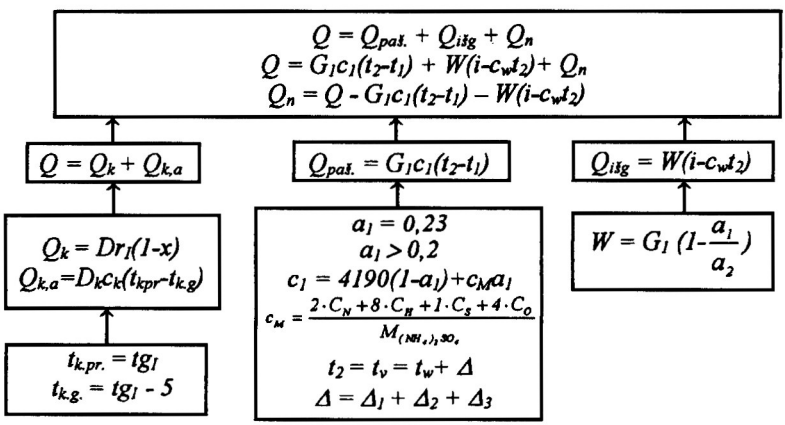
$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 = 1{,}86 + 2{,}0 + 1{,}0 = 4{,}86\ ^\circ\text{C}.$$

Naudingasis temperatūrų skirtumas:

$$\Delta t_n = t_{gI} - t_{gII} - \Delta = 133{,}0 - 89{,}3 - 4{,}9 = 38{,}8\ ^\circ\text{C}.$$

4.6. Pvz. Į garintuvą tiekiamas 1,5 t/h 23 % koncentracijos ir 16 °C temperatūros $(NH_4)_2SO_4$ tirpalas. Esant 0,1 MPa pertekliniam slėgiui tirpalas garinamas iki 42 % koncentracijos. Šildymo garų, kurių perteklinis slėgis 8 kgf/cm^2, o drėgnis 5 %, sąnaudos sudaro 1600 kg/h. Iš garintuvo ištekančio garų kondensato temperatūra 5 °C žemesnė už šildymo garų kondensacijos temperatūrą. Apskaičiuoti šilumos nuostolius į aplinką.

S p r e n d i m a s. Uždavinio sprendimui galima sudaryti tokią schemą.



1. Pagal kairiojo bloko lygtis apskaičiuojamas bendras iš šildymo garų gaunamas šilumos srautą Q.

a) šildymo sočiųjų vandens garų temperatūrą t_{gI} parenkame iš XVII lentelės pagal jų absoliutųjį slėgį:

$$p_{gI} = 1\ \text{kgf/cm}^2 + 8\ \text{kgf/cm}^2 = 9{\cdot}9{,}81{\cdot}10^4\ \text{Pa} = 882900\ \text{Pa} = 882{,}9\ \text{kPa};$$

Šiame slėgyje t_{gI} = 174,5 °C.
Tokia pati yra ir pradinė susidariusio kondensato temperatūra, t. y.

$$t_{gI} = t_s = t_{k.pr} = 174{,}5\ ^\circ\text{C};$$

b) ištekančio iš šildymo kameros kondensato temperatūra yra 5 °C žemesnė:

$$t_{k.g} = t_{gI} - 5 = 174{,}5 - 5 = 169{,}5\ ^\circ\text{C}.$$

Žinodami temperatūras $t_{k,per}$ ir $t_{k,g}$, galime nustatyti *vidutinę kondensato temperatūrą*, parinkti *vidutinę* kondensato savitąją šilumą c_k, šildymo sočiųjų vandens garų *kondensacijos (susidarymo) šilumą* r_1 ir apskaičiuoti sočiųjų vandens garų *kondensacijos* metu išsiskiriantį šilumos srautą Q_k bei *kondensato aušimo* šilumos srautą $Q_{k,a}$:

a) vidutinė susidariusio kondensato (vandens) savitoji šiluma c_k parenkama pagal vidutinę jo temperatūrą, $t_{k,pr} - t_{k,g}$ intervale:

$t_{k,vid} = (174{,}5 + 169{,}5)/2 = 172$ °C.

Esant šiai temperatūrai, $c_k = 4{,}41 \cdot 10^3$ J/(kg·K);

b) šildymo garų susidarymo šiluma r_1 parenkama iš XVII lentelės pagal jų absoliutųjį slėgį: $p_{g1} = 882{,}9$ kPa; $r_1 = 2040 \cdot 10^3$ J/kg;

c) šildymo garų sąnaudos:

$D = 1600$kg/h $= 1600/3600 = 0{,}444$ kg/s.

Tokio pat dydžio yra ir susidariusio kondensato debitas $D_k = 0{,}444$ kg/s.
Bendras iš šildymo garų gaunamas šilumos srautas:

$$Q = Q_k + Q_{k,aušš} = D \cdot r_1 \cdot (1 - x) + D_k \cdot c_k \cdot (t_{k\,pr} - t_{k\,g}) =$$

$$= 0{,}444 \cdot 2040 \cdot 10^3 \cdot (1 - 0{,}05) + 0{,}444 \cdot 4{,}41 \cdot 10^3 \cdot (174{,}5 - 169{,}5) = 870262 \text{ W}.$$

2. Analogišku eiliškumu pagal viduriniame bloke pateiktas lygtis apskaičiuojame šilumos srautą $Q_{paš}$, reikalingą *tirpalo pašildymui iki virimo temperatūros* t_2:

a) apskaičiuojame $(NH_4)_2SO_4$ tirpalo *virimo temperatūrą* t_2, esant 1 kgf/cm^2 pertekliniam slėgiui. Tuo tikslu pirmiausia reikia apskaičiuoti *temperatūrinę tirpalo virimo temperatūros depresiją* Δ_1.

Pagal galutinę verdančio $(NH_4)_2SO_4$ tirpalo koncentraciją $a_2 = 42$ % parenkame jo *virimo temperatūrą, esant atmosferiniam slėgiui* ir apskaičiuojame virimo temperatūros depresiją $\Delta_{1,at}$:

$t_{t,at} = 105$ °C; $\Delta_{1,at} = 105 - 100 = 5$ °C.

Temperatūrinę depresiją *perskaičiuojame* nurodytomis garinimo sąlygomis, pasinaudoję *Tiščenkos lygtimi*:

$$\Delta_1 = 16{,}2 \cdot [(273 + 119{,}6)^2/(2208 \cdot 10^3)] \cdot 5 = 5{,}65 \text{ °C}.$$

čia 119,6 °C – antrinių sočiųjų vandens garų temperatūra ir $2208 \cdot 10^3$ J/kg – antrinių sočiųjų vandens garų susidarymo šiluma. Šios vertės parinktos iš XVII lentelės pagal garų absoliutųjį slėgį $p_{g2} = 2$ kgf/cm^2.

Priėmus, kad hidrostatinė depresija $\Delta_2 = 2$ °C, hidraulinė depresija $\Delta_3 = 1$ °C, *bendroji tirpalo virimo temperatūros depresija*:

$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 = 5{,}65 + 2 + 1 = 8{,}65$ °C.

$(NH_4)_2SO_4$ tirpalo *virimo temperatūra*:

$t_2 = t_v = t_w + \Delta = 119{,}6 + 8{,}65 = 128{,}25 \approx 128$ °C;

b) apskaičiuojame sausos medžiagos c_M ir *tirpalo* c_1 *savitąsias šilumas*:

$$c_M = \frac{2 \cdot 26 + 8 \cdot 9{,}6 + 22{,}6 + 4 \cdot 16{,}8}{132} = 1{,}6712 \text{ kJ/(kg·K)};$$

$c_1 = 4190 \cdot (1 - 0{,}23) + 1671{,}2 \cdot 0{,}23 = 3610{,}7$ J/(kg·K);

c) apskaičiuojame šilumos srautą, kuris sunaudojamas tirpalo pašildymui iki virimo temperatūros:

$Q_{paš} = (1500/3600) \cdot 3610{,}7 \cdot (128 - 16) = 168499$ W.

3. Pagal dešiniajame schemos bloke nurodytas lygtis, apskaičiuojame šilumos srautą tirpiklio (vandens) W išgarinimui, esant tirpalo virimo temperatūrai t_2:

a) vandens kiekis W, kurį reikia išgarinti:

$W = G_1 \cdot (1 - a_1/a_2) = 0{,}417 \cdot (1 - 0{,}23/0{,}42) = 0{,}189$ kg/s;

b) antrinių sočiųjų vandens garų entalpiją h parenkame iš XVII lentelės pagal jų absoliutųjį slėgį $p_{abs} = 196{,}2$ kPa, $h = 2710 \cdot 10^3$ J/kg.

$Q_{išg.} = W \cdot (h - c_w \cdot t_2) = 0{,}189 \cdot (2710 \cdot 10^3 - 4{,}19 \cdot 10^3) = 511385$ W.

4. Iš šilumos balanso lygties apskaičiuojame šilumos nuostolius į aplinką:

$Q_n = Q - Q_{paš.} - Q_{išg.} = 870262 - 168499 - 511385 = 190378$ W.

4.7. Pvz. Apskaičiuoti šildančiųjų vandens garų sąnaudas nuolatinio veikimo garintuve, kuriame, esant atmosferiniam slėgiui, garinama 3t/h NaCl tirpalo nuo 11,0 % iki 20,3 % koncentracijos. Šildančiųjų garų perteklinis slėgis 0,3 MPa. Šilumos nuostoliai į aplinką 42500 W.

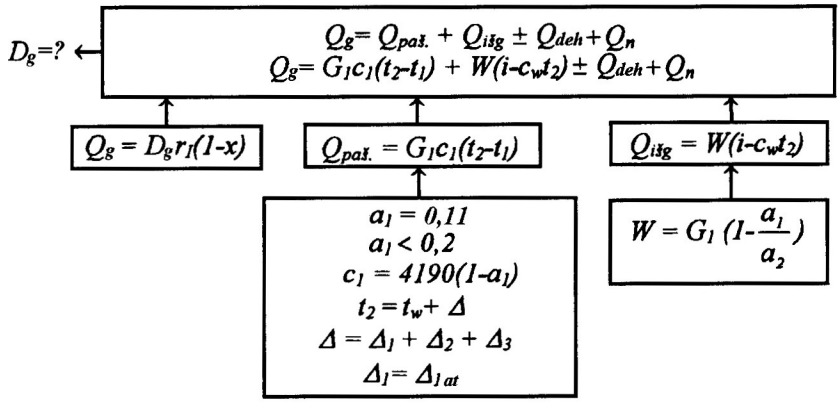
Apskaičiuoti ir palyginti garų sąnaudas 3 garinimo atvejais:

a) kai pradinė tirpalo temperatūra 20 °C;

b) kai į garinimo įrenginį tiekiamas pašildytas iki virimo temperatūros tirpalas;

c) kai į garinimo įrenginį tiekiamas iki 120 °C perkaitintas tirpalas.

S p r e n d i m a s. Šildančiųjų garų sąnaudų skaičiavimą atliksime pagal tokią schemą:



a) variantas

1) šildančiųjų garų sąnaudas D_g galėsime apskaičiuoti, žinant bendrą šilumos srautą Q_g, kurį turi perduoti tirpalui šildantieji garai:

$$Q_g = D_g \cdot r_1 \cdot (1 - x);$$

$r_1 = 2141 \cdot 10^3$ J/kg (iš XVII lentelės, esant $p_{abs} = 1 + 3 = 4$ kgf/cm^2 = 392,4 kPa);

2) Skaičiuojame *bendrą garinimui reikalingą šilumos srautą* Q_g *sudarančius narius*: $Q_{paš}$, $Q_{išg}$ ir $\pm Q_{deh}$. Tirpalo pašildymui iki virimo temperatūros sunaudojamas šilumos srautas $Q_{paš}$:

$$Q_{paš} = G_1 \cdot c_1 \cdot (t_2 - t_1);$$

$\Delta_1 = \Delta_{1\,atm} = 105 - 100 = 5$ °C;

čia – $\Delta_{1\,atm}$ (parenkama iš VIII lentelės, kai NaCl koncentracija $a_2 = 20,3$ %.)

Priėmus, kad hidrostatinė depresija $\Delta_2 = 2$ °C, hidraulinė depresija $\Delta_3 = 1$ °C, tai bendroji depresija:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 = 5 + 2 + 1 = 8 \text{ °C}.$$

Tirpalo virimo temperatūra:

$$t_2 = t_w + \Delta = 100 + 8 = 108 \text{ °C};$$

$$G_1 = 3\,t/h = \frac{3000\,kg}{3600\,s} = 0,833 \text{ kg/s};$$

$c_1 = 4190\ (1 - 0,11) = 3729,1$ J/(kg·K).

Tirpalo pašildymui nuo $t_1 = 20$ °C iki jo virimo temperatūros $t_2 = 108$ °C sunaudojamos šilumos srautas $Q_{paš}$:

$$Q_{paš} = 0,833 \cdot 3729,1 \cdot (108 - 20) = 273351 \text{ W}.$$

3) Tirpiklio kiekio išgarinimui sunaudojamas šilumos srautas $Q_{išg}$:

$$Q_{išg}=W\cdot(h - c_w\cdot t_2) = 0{,}382\cdot(2677\cdot10^3 - 4{,}23\cdot10^3\cdot108) = 848101 \text{ W};$$

$$W = G_1\cdot(1-\frac{a_1}{a_2}) = 0{,}833\cdot(1-\frac{0{,}110}{0{,}203}) = 0{,}382 \text{ kg/s};$$

čia $h = 2677\cdot10^3$ J/kg (iš XVII lentelės, esant atmosferiniam sočiųjų vandens garų slėgiui p = 1 at = 98,10 kPa;) $c_w = 4{,}23\cdot10^3$ J/(kg·K) – vandens savitoji šiluma, esant tirpalo virimo temperatūrai t_2 = 108 °C.

4) NaCl dehidratacijos metu sunaudojamą (arba išsiskiriantį) šilumos srautą Q_{deh} apskaičiuojame tam, kad galėtume palyginti jo dydį su kitais šilumos balanso nariais:

$$\pm Q_{deh} = Q_1 - Q_2.$$

čia Q_1 ir Q_2 – atitinkamai garinimui tiekiamo ir koncentruoto tirpalų susidarymo šilumos srautai, W

Norėdami apskaičiuoti NaCl dehidratacijos šilumos dydį, pirmiausia turime apskaičiuoti, kiek yra molių vandenyje, kuriame yra ištirpęs 1 molis NaCl garinimui tiekiamame (n_1) ir koncentruotame tirpale (n_2).

11 % koncentracijos garinimui tiekiamo tirpalo viename kilograme yra 110 g NaCl. Tai sudaro 110/58,5 = 1,88 molių NaCl. Analogiškai apskaičiuojame H_2O molių skaičių viename kilograme tirpalo: H_2O masė $m_{H_2O} = 1000 - 110 = 890$ g. Tai sudaro 890/18 = 49,44 molių H_2O. Vienam moliui NaCl garinimui tiekiamame tirpale tenka:

n_1 = 49,44 mol H_2O/1,88 mol NaCl = 26,3 mol H_2O.

Analogiškai apskaičiuojame H_2O molių kiekį, tenkantį vienam moliui NaCl koncentruotame tirpale. Viename kilograme koncentruoto (20,3 %) tirpalo yra 203 g NaCl. Tai sudaro 203/58,5 = 3,47 molių NaCl. Viename kilograme koncentruoto tirpalo yra 1000 – 203 = 797 g H_2O. Tai sudaro 797/18 = 44,28 molių H_2O. Koncentruoto tirpalo vienam moliui NaCl tenka:

n_2 = 44,28/3,47 = 12,8 molio H_2O.

Žinodami n_1 ir n_2 vertes, iš žinynų parenkame garinimui tiekiamo bei koncentruoto NaCl tirpalų susidarymo šilumas Q_1 bei Q_2 ir apskaičiuojame dehidratacijos šilumą Q'_{deh}, ištirpstant vienam moliui NaCl.

Q_1 = 407,815 kJ/mol, esant n_1 = 26,3 mol H_2O;

Q_2 = 408,950 kJ/mol, esant n_2 = 12,8 mol H_2O;

$Q'_{deh} = Q_1 - Q_2 = 407{,}815 - 408{,}950 = -1{,}135$ kJ/mol.

Tokiu pačiu santykiu pasikeis vandens kiekis ir vienam kmol NaCl, tik dehidratacijos metu išsiskirs 10^3 kartų daugiau šilumos.

Dehidratacijos metu bendrasis iš viso tirpalo išsiskiriantis šilumos srautas:

Q_{deh}= -1,135·1,88·10^3·0,833 = -1777 W.

Žinodami visus šilumos balanso lygties narius, galime apskaičiuoti ir šildančiųjų garų sąnaudas:

a) kai tirpalo pradinė temperatūra 20 °C

$$D_g = \frac{G_1 \cdot c_1 \cdot (t_2 - t_1) + W \cdot (i - c_w \cdot t_2) - Q_{deh} + Q_n}{r_1 \cdot (1 - x)} =$$

$$= \frac{273351 + 848101 - 1777 + 42500}{2141 \cdot 10^3 \cdot 1} = \frac{1162175}{2141000} = 0{,}543 \text{ kg/s};$$

b) kai tirpalas į garintuvą patenka pašildytas iki virimo temperatūros.

$$D_g = \frac{0 + 848101 - 1777 + 42500}{2141 \cdot 10^3} = \frac{888824}{2141 \cdot 10^3} = 0{,}415 \text{ kg/s}.$$

c) kai į garintuvą tiekiamas iki 120 °C perkaitintas tirpalas:

$Q_{paš} = G_1 c_1 (t_2 - t_1)$ = 0,833·3729,1·(108 – 120) = -37276 W.

Kiti šilumos balanso lygties nariai išlieka tokie patys kaip ir a) bei b) atvejais, todėl šiuo atveju reikalingos šildančiųjų garų sąnaudos:

$$D_g = \frac{-37276 + 848101 - 1777 + 42500}{2141 \cdot 10^3} = \frac{851548}{2141 \cdot 10^3} = 0{,}398 \text{ kg/s}.$$

Palyginimui sudarome suvestinę lentelę:

Variantas	Sunaudojama šiluma, W				Reikalingos garų sąnaudos, kg/s
	$Q_{paš}$	$Q_{išg}$	Q_{deh}	Q_n	
a	273351	848101	-1777	42500	0,543
b	0	848101	-1777	42500	0,415
c	-37276	848101	-1777	42500	0,398

Kaip matome, visais atvejais dehidratacijos šiluma sudaro tik nežymią dalį ($\frac{1777}{851548} \cdot 100 = 0{,}2$ % ir mažiau), todėl, skaičiuojant garinimo procesą, į dehidratacijos šilumą dažniausia neatsižvelgiama.

4.3. Kontroliniai uždaviniai

4.1. Nustatyti 8 % koncentracijos $MgCl_2$ tirpalo virimo temperatūros fizikinę-cheminę depresiją Δ_1, kai garinama: a) esant 760 mm Hg slėgiui; b) esant 0,08 MPa absoliučiajam slėgiui; c) esant 0,2 MPa viršslėgiui.

4.2. Nustatyti 17 % koncentracijos KOH tirpalo virimo temperatūras: a) garintuvo separatoriuje palaikomas atmosferinis slėgis; b) esant 120 mm Hg vakuumui; c) esant 0,16 MPa absoliučiajam slėgiui.

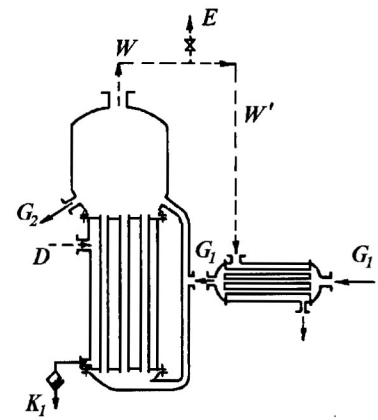
4.3. Apskaičiuoti 48 % koncentracijos NaOH tirpalo savitąją šilumą ir jo sočiųjų garų susidarymo šilumą, esant p_{abs} = 0,08 MPa slėgiui, jei žinoma, kad, esant 760 mm Hg slėgiui, šio tirpalo virimo temperatūra t_v = 140 °C, o esant p_{abs} = 0,02 MPa, t_v = 99 °C.

4.4. Nustatyti garintuvo naudingą temperatūrų skirtumą, jei šildančiųjų garų absoliutusis slėgis 0,2 MPa, garintuvo separatoriuje yra 0,03 MPa vakuumas, o šildymo kameroje garinamas 14 % koncentracijos KCl tirpalas.

4.5. Į garintuvą tiekiama 1500 kg/h 10 % koncentracijos cukraus tirpalo. Kiek vandens reikia išgarinti, norint gauti 20 % ir 50 % koncentracijos tirpalus?

4.6. Esant atmosferiniam slėgiui, į garintuvą tiekiama 1,4 t/h 18 °C temperatūros tirpalo, kuris išgarinamas nuo 9 % iki 32 % koncentracijos. Iš garintuvo ištekančio tirpalo temperatūra 105 °C. Šilumos nuostoliai 80000 W. Apskaičiuoti reikalingas šildančiųjų garų sąnaudas, jei sočiųjų vandens garų manometrinis slėgis 0,2 MPa, o drėgnis 4,5 %.

4.7. Iš garintuvo išteka 800 kg/h 30 % koncentracijos $(NH_4)_2SO_4$ tirpalo. Iki patekimo į garintuvą 12 % koncentracijos tirpalas pašildomas šilumokaityje nuo 24 °C iki 80 °C temperatūros iš garintuvo gaunamais antriniais garais. Likusi antrinių garų (ekstragarų) E dalis naudojama kitų aparatų šildymui (4.1. pav.). Šilumos nuostoliai sudaro 6 % nuo tirpalo pašildymui ir tirpiklio išgarinimui reikalingo suminio šilumos kiekio. Hidraulinė depresija vamzdyne nuo separatoriaus iki šilumokaičio Δ_3 = 1,0 °C. Apskaičiuoti: 1) šildančiųjų garų sąnaudas, jei jų perteklinis slėgis 0,2 MPa, drėgnis 5 %; 2) reikalingą šilumokaičio-šildytuvo šilumokaitos paviršiaus plotą, kai šilumos perdavimo koeficientas jame K = 700 W/(m^2·K).



4.1. pav. Garintuvo su pradinio tirpalo šildymu šilumokaityje schema

4.8. Apskaičiuoti iš garintuvo ištekančio tirpalo debitą, kg/h, ir jo koncentraciją bei šildančiųjų garų kiekį, jei, esant atmosferiniam slėgiui, garinama 0,75 kg/s tirpalo, kurio temperatūra 95 °C, koncentracija 7 %. Temperatūra šildymo kameros viduriniame taške 105 °C; ištekančio tirpalo temperatūra 103 °C. Šildančiųjų garų manometrinis slėgis 0,2 MPa, jo drėgnis 5 %. Šildymo kameros šilumos mainų paviršiaus plotas $F = 52$ m^2, šilumos perdavimo koeficientas $K = 560$ W/(m^2·K). Suminiai šilumos nuostoliai į aplinką 110 kW.

4.9. Garintuve išgarinama 10 t/h tirpalo nuo 8 % iki 42 % koncentracijos. Verdančio tirpalo viduriniame sluoksnyje yra absoliutusis 0,04 MPa slėgis. Įtekančio į garintuvą tirpalo temperatūra 74 °C. Šildančiųjų garų manometrinis slėgis $p_m = 0{,}01$ MPa, šildymo kameros šilumos perdavimo koeficientas $K = 950$ W/(m^2·K). Šilumos nuostoliai sudaro 3 % nuo suminės tirpalo šildymo iki virimo temperatūros ir tirpiklio išgarinimui sunaudotos šilumos, hidrostatinė depresija 3 °C, hidraulinė depresija 1,0 °C. Apskaičiuoti reikalingą šildymo kameros paviršiaus plotą.

4.10. Apskaičiuoti garintuvo šildymo kameros reikalingą šilumos mainų paviršiaus plotą ir šildančiųjų garų sąnaudas, jei jų absoliutusis slėgis 0,2 MPa, drėgnis 4 %. Garinama, esant atmosferiniam slėgiui, 1600 kg/h 30 °C temperatūros tirpalo nuo 10 % iki 40 % koncentracijos. Naudingasis temperatūrų skirtumas 12 °C. Šildymo kameros šilumos perdavimo koeficientas $K = 900$ W/(m^2·K). Šilumos nuostoliai sudaro 5 % nuo suminio naudingo šilumos kiekio (sunaudojamo tirpalo pašildymui iki virimo temperatūros ir tirpiklio išgarinimui).

4.11. Apskaičiuoti šildančiųjų garų (drėgnis 3 %) slėgį ir savitąsias jų sąnaudas, jei garintuvo separatoriuje palaikomas 0,08 MPa absoliutusis slėgis. Garinama 2,0 kg/s 70 °C temperatūros tirpalo nuo 5 % iki 8 %.koncentracijos. Šildymo kameros šilumokaitos paviršiaus plotas 90 m^2, šilumos perdavimo koeficientas $K = 1500$ W/(m^2·K). Fizikinė-cheminė virimo temperatūros depresija 5 °C, hidrostatinė depresija 2 °C. Šilumos nuostoliai į aplinką nevertinami.

5 dalis. MASĖS MAINŲ PAGRINDAI. ABSORBCIJA

5.1. Masės mainų pagrindiniai dėsningumai ir skaičiavimų lygtys

Masės mainų procesais vadinami procesai, kurių metu vyksta medžiagos pernaša iš vienos fazės į kitą. Tiriamos fazės ribose medžiaga pernešama iš tašku, kuriame pernešamos medžiagos koncentracija didesnė į tašką, kuriame ši koncentracija mažesnė. Todėl paprastai inžineriniuose skaičiavimuose varos jėga išreiškiama koncentracijų skirtumu, kas suprastina masės mainų procesų skaičiavimą.

Masės mainų procesai plačiai naudojami perskiriant homogenines skystas bei dujines medžiagas ir jas koncentruojant, o taip pat vykdant gamtos apsaugą (visų pirma valant technologinius nutekamuosius vandenis ir atidirbusias dujas).

Masės mainams priskiriama: absorbcija, adsorbcija, rektifikacija (distiliacija), ekstrakcija, džiovinimas, membraniniai procesai.

Tikslinis komponentas gali būti pernešamas tik tuo atveju, jei nėra pusiausvyros tarp koncentracijų įvairiuose erdvės taškuose arba medžiagose, esančiose abiejose fazes skiriančio paviršiaus pusėse. Komponento pernešimo greitis yra proporcingas sistemos nuokrypio nuo pusiausvyros dydžiui.

1. Dvikomponenčių sistemų skystis – dujos (garai) įvairūs fazių sudėties reiškimo būdai pateikti 5.1 lentelėje. Skystos fazės sudėties perskaičiavimo lygtys pateiktos 5.2 lentelėje. Koncentracijos dujų (garų) fazėje žymimos y, Y arba C_y, skystyje – x, X arba C_x. Tos pačios koncentracijų perskaičiavimo lygtys tinka skysčiams ir garams bei dujoms, skiriasi tik simboliai x keičiami į y, X į Y, C_x į C_y.

5.1 lentelė. Dvikomponenčių ($A + B$) mišinių koncentracijų reiškimo būdai ir sutartiniai žymėjimai

Koncentracijos reiškimo būdas	Komponento A kiekio žymėjimas	
	skystyje	dujose (garuose)
Molio dalis, kmol A/kmol ($A + B$)	x	y
Masės dalis, kg A/kg ($A + B$)	$\overline{x}$	$\overline{y}$
Santykinė molio dalis, (tūrinė koncentracija), kmol A/kmol B	X	Y
Santykinė masės dalis, kg A/kg B	$\overline{X}$	$\overline{Y}$
Molinė koncentracija, kmol A/m^3 ($A + B$)	C_x	C_y
Masės koncentracija, kg A/m^3 ($A + B$)	$\overline{C}_x$	$\overline{C}_y$

2. Idealių dujų (garų) mišinyje komponento molinė (arba jai lygi tūrinė) dalis y išreiškiama Daltono dėsniu:

$$y = p/P \qquad (5.1)$$

čia p – dujų mišinio komponento parcialinis slėgis, Pa; $P = p_A + p_B + p_C + \ldots$ – dujų arba garų mišinio parcialinis, Pa.

3. Idealių tirpalų tarpfazinės pusiausvyros dėsniai

a) Henrio dėsnis:

$$p^* = E \cdot x; \tag{5.2}$$

čia p^* – parcialinis komponento slėgis dujų mišinyje, pusiausvirame su skysčio mišiniu, Pa; x – molinė komponento dalis skystyje; E – Henrio konstanta.

Į (5.2) lygtį įstatę (5.1) lygtį ir esant pusiausvyrai $p^* = y^* \cdot P$, gauname:

$$y^* = m \cdot x \tag{5.3}$$

čia y^* – komponento molio dalis dujų fazėje, pusiausviroje su skysčiu; $m = E/P$ – pasiskirstymo koeficientas, kai $t = const$ ir $P = const$.

Trikomponentės (A, B, C) dvifazės sistemos (dujas sudaro $A + B$, skystį $A + C$ komponentai) komponento A koncentracijas x ir y išreiškę santykinėmis molinėmis ir masės dalimis X ir Y^*, $\overline{X}$ *ir* $\overline{Y}^*$, ir įstatę į (5.3) lygtį gauname:

$$\frac{Y^*}{1+Y^*} = m \cdot \frac{X}{1+X}; \tag{5.4}$$

$$\frac{\overline{Y}^*}{\overline{Y}^* + M_A/M_B} = m \cdot \frac{\overline{X}}{\overline{X} + M_A/M_C}; \tag{5.5}$$

čia M_A, M_B, M_C – mišinio komponentų A, B, C molio masė, kg/kmol.

b) Raulio dėsnis:

$$p^* = P^* \cdot x; \tag{5.6}$$

čia p^* – komponento parcialinis slėgis dujų-garų mišinyje virš pusiausviro su mišiniu skysčio; Pa, $P^* = P^*(t)$ – gryno komponento sočiųjų garų slėgis, Pa; x – molinė komponento dalis skystyje.

Į (5.6) lygtį įstatę pertvarkytą (5.1) lygtį $p^* = y^* \cdot P$, gauname:

$$y^* = P^* \cdot x/P; \tag{5.7}$$

čia y^* – komponento molinė dalis dujų fazėje, esančioje pusiausvyroje su skysčiu.

Mišinių, sudarytų iš dviejų Raulio dėsniu aprašomų komponentų, (5.7) lygtis pertvarkoma į lygtį:

$$y_A^* = \alpha \cdot x_A / \left[1 + (\alpha - 1) \cdot x_A\right] \tag{5.8}$$

čia $\alpha = P_A^*/P_B^*$ – santykinio lakumo koeficientas; P_A^* *ir* P_B^* – tos pačios temperatūros lakesnio (žemesnės virimo temperatūros) komponento ir mažiau lakaus (aukštesnės virimo temperatūros) komponento sočiųjų garų slėgis, Pa.

5.2 lentelė. Dvikomponenčių mišinių koncentracijų perskaičiavimo lygtys

Koncentracija	x	$\bar{x}$	X	$\bar{X}$	C_x	$\bar{C}_x$
x	-	$\frac{\bar{x}M_{miš}}{M_A}$ arba $\frac{\bar{x}/M_A}{\frac{\bar{x}}{M_A}+\frac{1-\bar{x}}{M_B}}$	$\frac{X}{1+X}$	$\frac{M_B\bar{X}}{M_B\bar{X}+M_A}$	$\frac{C_xM_{miš}}{\rho}$ arba $\frac{C_xM_B}{\rho+C_x(M_B-M_A)}$	$\frac{\bar{C}_xM_{miš}}{\rho M_A}$ arba $\frac{\bar{C}_xM_B}{\rho M_A+\bar{C}_x(M_B-M_A)}$
$\bar{x}$	$\frac{M_Ax}{M_{miš}}$	-	$\frac{M_AX}{M_AX+M_B}$	$\frac{\bar{X}}{1+\bar{X}}$	$\frac{M_AC_x}{\rho}$	$\frac{\bar{C}_x}{\rho}$
X	$\frac{x}{1-x}$	$\frac{\bar{x}M_B}{M_A(1-\bar{x})}$	-	$\frac{M_B\bar{X}}{M_A}$	$\frac{M_BC_x}{\rho-M_AC_x}$	$\frac{M_B\bar{C}_x}{M_A(\rho-\bar{C}_x)}$
$\bar{X}$	$\frac{M_Ax}{M_B(1-x)}$	$\frac{\bar{x}}{1-\bar{x}}$	$\frac{M_AX}{M_B}$	-	$\frac{M_AC_x}{\rho-M_AC_x}$	$\frac{\bar{C}_x}{\rho-\bar{C}_x}$
C_x	$\frac{\rho x}{M_{miš}}$	$\frac{\rho\bar{x}}{M_A}$	$\frac{\rho X}{M_AX+M_B}$	$\frac{\rho\bar{X}}{M_A(\bar{X}+1)}$	-	$\frac{\bar{C}_x}{M_A}$
$\bar{C}_x$	$\frac{\rho M_Ax}{M_{miš}}$	$\rho\bar{x}$	$\frac{M_A\rho X}{M_AX+M_B}$	$\frac{\rho\bar{X}}{\bar{X}+1}$	M_AC_x	-

Pastabos: M_A, M_B, $M_{miš}$ – komponentų ir jų mišinio molekulinė masė, kg/kmol, $M_{miš} = M_A \cdot x + M_B \cdot (1 - x)$,
ρ – mišinio tankis, kg/m^3. Idealių dujų mišinių

4. Masė pernešama dviem būdais: molekuline difuzija ir konvekciniu masės pernešimu.

Komponento difuzija gali vykti nejudančioje medžiagoje arba judančiame agento sraute. Difuzinis komponento srautas susidaro tada, kai yra koncentracijos gradientas. Komponento molekulinės difuzijos srauto tankis išreiškiamas Fiko dėsniu:

$$g_d = -D \cdot grad\overline{C}_y ; \qquad (5.9)$$

čia $grad\overline{C}_y$ – tikslinio komponento vidutinės koncentracijos agento sraute $\overline{C}_y$ gradientas difuzinio srauto kryptimi, kg/m^3; g_d – difuzinio srauto tankis, kg/(m^2·s); D – komponento difuzijos koeficientas aplinkoje, m^2/s; (minuso ženklas rodo, kad difuzinis srautas nukreiptas koncentracijos mažėjimo kryptimi).

Konvekcinis pernešimas vyksta tada, kai tikslinį komponentą perneša judantis agento srautas:

$$\overline{g}_k = \overline{w} \cdot \overline{C}_y ; \qquad (5.10)$$

čia $\overline{g}_k$ – komponento konvekcinio srauto tankis, kg/(m^2·s); $\overline{w}$ – vidutinis agento judėjimo greitis, m/s; $\overline{C}_y$ – tikslinio komponento vidutinė koncentracija, kg/m^3.

5. Komponento pernašos iš vienos fazės į kitą greitis M yra proporcingas nukrypimo nuo pusiausvyros laipsniui (proceso varos jėgai), kuris nusakomas medžiagų pusiausviros ir darbinės, arba atvirkščiai koncentracijų vienoje fazėje skirtumui. Fazių sudėtis gali būti išreikšta įvairiais koncentracijos matavimo, o kai yra dujos, ir parcialinio slėgio vienetais. Todėl masės pernašos proceso varos jėga gali turėti įvairias vertes.

Pagal masės perdavimo proceso varos jėgos išreiškimo būdus masės perdavimo lygtis gali būti užrašyta:

$$M = K_y \cdot \Delta y_{vid} \cdot F ; \qquad (5.11)$$

$$M = K_x \cdot \Delta x_{vid} \cdot F ; \qquad (5.12)$$

čia M – komponento pernašos iš vienos fazės į kitą greitis, kmol/s; F – masės perdavimo paviršiaus plotas, m^2; K_y – masės perdavimo koeficientas, kai varos jėga Δy, kmol/m^3; K_x – masės perdavimo koeficientas, kai varos jėga Δx, kmol/m^3; Δy_{vid} *ir* Δx_{vid} – atitinkamos proceso varos jėgos, vidutinės visam masės perdavimo paviršiui F.

Masės perdavimo lygtyje komponento kiekis gali būti matuojamas kilogramais, o varos jėgos išraiškose vietoje kmol naudojami kg, t. y. vietoje Δy_{vid} gali būti ΔY_{vid}, $\Delta C_{y\,vid}$ ir Δp_{vid}, atitinkamai vietoje Δx_{vid} gali būti ΔX_{vid}, $\Delta C_{x\,vid}$.

6. Komponento pernašos iš fazės srauto į jos paviršių (masės atidavimo) greitis M užrašomas masės atidavimo lygtimi:

$$M = \beta_y \cdot \left(y - y_p''\right) \cdot F = \beta_x \cdot \left(x_p'' - x\right) \cdot F ; \qquad (5.12a)$$

čia β_x, β – masės atidavimo iš fazės srauto į fazes skiriantį paviršių, arba iš paviršiaus į fazės srautą koeficientas; F – fazių sąlyčio paviršiaus plotas, m^2; M – masės atidavimo greitis, kg (kmol/(m^2·s)); y_p'', x_p'' – pusiausvira koncentracija fazių sąlyčio paviršiuje.

7. Priklausomybė tarp masės perdavimo ir masės atidavimo koeficientų. Kai komponentui pereinant per fazes skiriantį paviršių yra nevertinamas paties paviršiaus pasipriešinimas ir pačiame paviršiuje pusiausvyra užrašoma tiesės lygtimi $y^* = m \cdot x$, tai tarp masės perdavimo koeficientų K_y bei K_x ir fazių masės atidavimo koeficientų β_y bei β_x egzistuoja priklausomybės:

$$K_y = \frac{1}{1/\beta_y + m/\beta_x} ; \qquad (5.13)$$

$$K_X = \frac{1}{1/(m \cdot \beta_y) + 1/\beta_x} ; \qquad (5.14)$$

čia m – pusiausvyros linijos pasvirimo į x ašį tangentas.

Priklausomybių (5.13) ir (5.14) vardikliai išreiškia bendrą difuzinį pasipriešinimą, lygų difuzinių pasipriešinimų dujų ir skysčio fazėse sumai.

Iš (5.13) ir (5.14) lygčių seka:

$$K_y = K_x / m . \qquad (5.15)$$

8. Pagrindiniai masės atidavimo procesų difuzinio panašumo (difuziniai) kriterijai. Difuzinis Niuselto kriterijus nurodo santykį tarp konvekcinio ir difuzinio masės atidavimo srauto intensyvumo, kai srautai juda skersai nejudančio medžiagos-nešiklio sluoksnio:

$$Nu' = \beta \cdot l / D . \qquad (5.16)$$

Difuzinis Pekle kriterijus nurodo konvekcinio ir difuzinio pernešimo pagrindiniame agento sraute intensyvumų santykį:

$$Pe' = w \cdot l / D . \qquad (5.17)$$

Difuzinis Prandtlio kriterijus nurodo klampos ir agento srauto difuzinių savybių santykį:

$$Pr' = Pe'/Re = \nu/D\,; \qquad (5.18)$$

šiose lygtyse β – masės atidavimo koeficientas, m/s (kmol/(m^2·s kmol/m^3) arba kg/(m^2·s kg/m^3)); l – srauto charakteringas matmuo, m; D – tikslinio komponento molekulinės difuzijos koeficientas, m^2/s; w – srauto greitis, m/s; ν – kinematinė terpės klampa, m^2/s.

9. Dujų *A* molekulinės difuzijos koeficientas dujose *B* gali būti apskaičiuotas pagal lygtį:

$$D_d = \frac{4{,}3\cdot 10^{-7}\cdot T^{3/2}}{p\cdot\left(v_A^{1/3}+v_B^{1/3}\right)^2}\sqrt{\frac{1}{M_A}+\frac{1}{M_B}}\,; \qquad (5.19)$$

čia 4,3 10^{-7} – koeficientas, priklausantis nuo difunduojančios medžiagos ir difuzijos terpės molio masės; D_d – difuzijos koeficientas, m^2/s; T – temperatūra, K; p – absoliutinis slėgis, kgf/cm^2; M_A *ir* M_B – dujų A ir B kilomolio masės, kg/kmol; v_A ir v_B – dujų A ir B moliniai tūriai, m^3.

Jei žinoma difuzijos koeficiento D_1 vertė, esant temperatūrai T_1 ir slėgiui p_1, tai D_2 vertė, esant temperatūrai T_2 ir slėgiui p_2, apskaičiuojama pagal lygtį:

$$D_2 = D_1\cdot\frac{p_1}{p_2}\cdot\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{3/2}. \qquad (5.20)$$

10. Molekulinės difuzijos koeficiento D_s 20 °C temperatūros skystyje apytikslė vertė gali būti apskaičiuota pagal lygtį:

$$D_s = \frac{1\cdot 10^{-6}}{A\cdot B\cdot\sqrt{\mu}\cdot\left(v_A^{1/3}+v_B^{1/3}\right)^2}\cdot\sqrt{\frac{1}{M_A}+\frac{1}{M_B}}\,. \qquad (5.21)$$

Dujų difuzijos t temperatūros skystyje koeficientas D_t, gali būti apskaičiuotas pagal lygtį:

$$D_t = D_{20}\cdot\left[1+b\cdot(t-20)\right]. \qquad (5.22)$$

Lygties temperatūrinis koeficientas b gali būti apskaičiuotas pagal empirinę lygtį:

$$b = 0{,}2\cdot\sqrt{\mu}/\sqrt[3]{\rho}\,; \qquad (5.23)$$

čia D_s – difuzijos skystyje koeficientas, m^2/s; μ – skysčio dinaminė klampa, mPa·s; v_A ir v_B – ištirpusios medžiagos ir tirpiklio molių tūriai, m^3; M_A ir M_B – ištirpusios medžiagos ir tirpiklio molių masės; A ir B – nuo ištirpusios medžiagos ir tirpiklio kilmės priklausantys koeficientai; ρ – skysčio tankis, kg/m^3.

Difuzijos praskiestuose tirpaluose koeficientą D_s, m^2/s, taip pat galima apskaičiuoti pagal lygtį:

$$D_s = 7{,}4 \cdot 10^{-12} \cdot (\beta_a \cdot M)^{1/2} \cdot T/(\mu \cdot v^{0{,}6}). \qquad (5.24)$$

čia M – tirpiklio molio masė; v – difunduojančios medžiagos molio tūris, m^3/kmol; T – temperatūra, K; μ – tirpiklio dinaminė klampa, mPa·s; β_a – tirpiklio molekulių asociaciją įvertinantis dydis: metanoliui – 1,9; etanoliui – 1,5; benzenui – 1,0; eteriui – 1,0; heptanui – 1,0; vandeniui – 2,6.

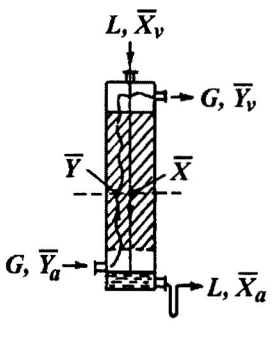
5.2. Absorbcijos pagrindiniai dėsningumai ir skaičiavimų lygtys

Absorbcijos skaičiavimui naudojamos aukščiau pateiktos pagrindinės masės mainų skaičiavimo lygtys.

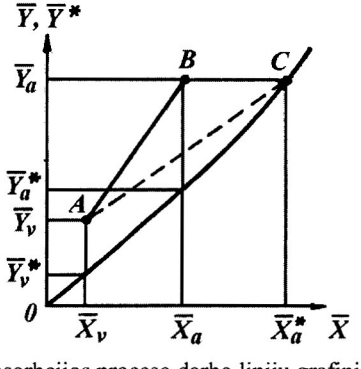
1. Nuolatinio veikimo absorberio (5.1 pav.) medžiagų balansas, masės vieneto dalimis, užrašomas lygtimi:

$$M = G \cdot (\overline{Y}_a - \overline{Y}_v) = L \cdot (\overline{X}_a - \overline{X}_v); \qquad (5.25)$$

čia M – nelakaus absorbuoto komponento kiekis, kg/s; G, L – inertinių dujų ir skysto nelakaus sorbento kiekis, kg/s; $\overline{Y}_a$ ir $\overline{Y}_v$ – vidutinė absorbtyvo koncentracija inertinėse dujose, kg/kg; $\overline{X}_a$ ir $\overline{X}_v$ – vidutinė absorbtyvo (absorbato) koncentracija absorbente, kg/kg. Indeksas a nurodo koncentraciją aparato apačioje, v – aparato viršuje (dujos juda iš apačios į viršų, o skystis juda iš viršaus žemyn).



5.1 pav. Skysčio ir dujų srautų absorberyje schema



5.2 pav. Absorbcijos proceso darbo linijų grafinis vaizdavimas. OC – pusiausvyros linija; AB – darbo linija, kai absorbento sąnaudos L; AC – darbo linija, kai absorbento sąnaudos minimalios L_{min} (nuolatinis absorbcijos procesas)

Koordinatėse $\overline{Y} - \overline{X}$, esant pastovioms G ir L vertėms, lygtis (5.25) atvaizduojama tiese, einančia per taškus $A[\overline{Y}_a, \overline{X}_a]$ *ir* $B[\overline{Y}_v, \overline{X}_v]$ (5.2 pav.). Tokia linija vadinama darbo linija, kurios lygtys yra šios:

$$\overline{Y} = \overline{Y}_a + (L/G)\cdot\left(\overline{X} - \overline{X}_a\right); \qquad (5.26)$$

arba

$$\overline{Y} = \overline{Y}_v + (L/G)\cdot\left(\overline{X} - \overline{X}_v\right); \qquad (5.27)$$

čia $\overline{Y}$ *ir* $\overline{X}$ – koncentracijos pagal kolonos aukštį, santykiniais masės vienetais, esančiuose kontakte nepusiausviruose dujų ir skysčio srautuose bet kuriame absorberio (5.1 pav.) skerspjūvyje.

Absorbento debitas apskaičiuojamas:

$$L = \varphi \cdot L_{min}; \qquad (5.28)$$

čia $\varphi > 1$ – absorbento pertekliaus koeficientas; L_{min} – teorinis minimalus absorbento debitas, kg/s, nustatomas grafiškai (žr. 5.2 pav.) arba apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$L_{min} = M\Big/\left(\overline{X}_a^* - \overline{X}_v\right); \qquad (5.29)$$

čia $\overline{X}_a^*$ – absorbtyvo koncentracija absorbente, $kg_{absorbtyvo}/kg_{absorbento}$, pusiausvira su $\overline{Y}_a$

Absorbcijos laipsniu η_a vadinamas santykis:

$$\eta_a = \left(\overline{Y}_a - \overline{Y}_v\right)\Big/\overline{Y}_a = \left(Y_a - Y_v\right)/Y_a. \qquad (5.30)$$

2. Vidutinės varos jėgos $\Delta\overline{Y}_{vid}$ skaičiavimas absorberyje su nepertraukiamu fazių kontaktu.

Fazių sąlyčio (įkrovos) paviršiaus plotas, m^2, apskaičiuojamas pagal aukščiau pateiktą masės perdavimo lygtį:

$$F = M\Big/\left(K_y \cdot \Delta\overline{Y}_{vid}\right); \qquad (5.31)$$

čia F – masės perdavimo paviršius, m^2; M – absorbtyvo debitas, kg/s; K_y – masės perdavimo koeficientas, $kg/(m^2\cdot s(kg/kg_{inertinių\ dujų}))$; $\Delta\overline{Y}_{vid}$ – vidutinė varos jėga, kg/kg.

$\Delta\overline{Y}_{vid}$ – apskaičiuojama taip: jeigu pusiausvyros linija intervale nuo $\overline{X}_v$ iki $\overline{X}_a$ yra tiesė (5.3 pav.), tai:

$$\Delta\overline{Y}_{vid} = \left(\Delta\overline{Y}_a - \Delta\overline{Y}_v\right)\Big/ln\left(\Delta\overline{Y}_a/\Delta\overline{Y}_v\right); \qquad (5.32)$$

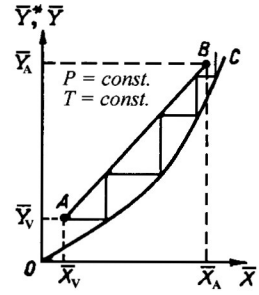
čia $\Delta\overline{Y}_a$, $\Delta\overline{Y}_v$ – varos jėgos aparato apačioje ir viršuje arba $\Delta\overline{Y}_a = \overline{Y}_a - \overline{Y}_a^*$ – dujų srautui įtekant į absorberį ir $\Delta\overline{Y}_v = \overline{Y}_v - \overline{Y}_v^*$ – dujų srautui ištekant iš absorberio.

Jei $0{,}5 \le \Delta\overline{Y}_a / \Delta\overline{Y}_v \le 2{,}0$, tai vidutinę varos jėgą absorberyje galima apskaičiuoti pagal aritmetinio vidurkio skaičiavimo lygtį:

$$\Delta\overline{Y}_{vid} = \left(\Delta\overline{Y}_a - \Delta\overline{Y}_v\right)/2 . \qquad (5.33)$$

Bendruoju atveju, kai pusiausvyros linija ne tiesė:

$$\Delta\overline{Y}_{vid} = \left(\Delta\overline{Y}_a - \Delta\overline{Y}_v\right) \Big/ \int_{\overline{Y}_v}^{\overline{Y}_a} \frac{d\overline{Y}}{\overline{Y} - \overline{Y}^*} . \qquad (5.34)$$



5.3 pav. Koncentracijos kitimo pakopų (teorinių lėkščių) skaičiaus grafinis nustatymas nuolatinio veikimo absorbcijos procesui

Vardiklyje esančio integralo vertė gali būti nustatyta grafinio integravimo metodu arba pagal pusiausvyros liniją, ją padalinus į atkarpas, kurios artimos tiesėms. Po to pagal (5.32) arba (5.33) lygtis kiekvienai atkarpai apskaičiuojama vidutinė varos jėga, o iš pastarųjų-vidutinė visam procesui.

3. Įkrautinio absorberio skersmens *d* skaičiavimas.

Absorbcijos kolonos skersmuo *d*, m, apskaičiuojamas pagal dujų srauto debito lygtį:

$$d = \sqrt{V_s / (0{,}785 \cdot w)} ; \qquad (5.35)$$

čia V_s – pro absorberį pratekančių dujų sekundinis debitas, m^3/s; w – dujų srauto (fiktyvus) greitis, apskaičiuotas kaip vidutinis visam kolonos skerspjūvio plotui, m/s.

Dujų greitis w apskaičiuojamas taip: pradžioje apskaičiuojamas fiktyvus dujų greitis w_3 absorbento pakibimo kolonoje (inversijos) taške. Kai $\rho_{sk} >> \rho_d$ pagal lygtį:

$$lg\left(\frac{w_3^2 \cdot \sigma \cdot \rho_d \cdot \mu_{sk}^{0,16}}{g \cdot V_l^3 \cdot \rho_{sk}}\right) = A - 1{,}75 \cdot \left(\frac{L}{G}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{\rho_d}{\rho_{sk}}\right)^{0,125} ; \qquad (5.36)$$

čia σ – įkrovos savitasis paviršiaus plotas, m^2/m^3; g – laisvai krintančių kūnų pagreitis, m/s^2; ρ_d ir ρ_{sk} – dujų ir skysčio tankis, kg/m^3; μ_{sk} – skysčio dinaminė klampa, mPa·s; L ir G – skysčio ir dujų masės debitai, kg/s.

Absorberiams, dirbantiems plėveliniu režimu fiktyvus greitis:

$$w = (0{,}75 \div 0{,}9) \cdot w_3 . \qquad (5.37)$$

4. Įkrautinio absorberio aukštis $H_{\dot{l}}$ skaičiuojamas dviem būdais:

a) naudojant masės perdavimo vieneto aukštį (*MPVA*).

Fazių sąlyčio paviršiaus plotas plėveliniu režimu dirbančiame absorberyje

$$F = H_{\dot{l}} \cdot S \cdot \sigma \cdot \psi ; \tag{5.38}$$

čia $H_{\dot{l}}$ – įkrovos sluoksnio aukštis, m; $S = \pi \cdot D^2/4$ – kolonos skerspjūvio plotas, m^2; D – kolonos skersmuo, m; σ – sausos įkrovos savitasis paviršiaus plotas, m^2/m^3; ψ – įkrovos drėkinimo koeficientas.

Įkrovos sluoksnio aukštis:

$$H_{\dot{l}} = \frac{G}{K_y \cdot S \cdot \sigma \cdot \psi} \cdot \int_{\overline{Y}_{\dot{l}}}^{\overline{Y}_{i\check{s}}} \frac{d\overline{Y}}{\overline{Y} - \overline{Y}^*} = h_{0y} \cdot n_{0y} ; \tag{5.39}$$

čia G – pastovus pagal visą kolonos aukštį inertinių dujų masės debitas, kg/s; K_y – masės perdavimo koeficientas, $kg/[m^2 \cdot s \cdot (kg/kg_{inertinių\ dujų})]$, h_{0y} – masės perdavimo vieneto aukštis, m; n_{0y} – bendras masės perdavimo vienetų skaičius (*MPVS*).

$$h_{0y} = G/\left(K_y \cdot S \cdot \sigma \cdot \psi\right); \tag{5.40}$$

$$n_{0y} = \int_{\overline{Y}_{\dot{l}}}^{\overline{Y}_{i\check{s}}} \frac{d\overline{Y}}{\overline{Y} - \overline{Y}^*} . \tag{5.41}$$

Iš (5.34) lygties gauname:

$$n_{0y} = \left(\overline{Y}_{\dot{l}} - \overline{Y}_{i\check{s}}\right) / \Delta\overline{Y}_{vid} . \tag{5.42}$$

Jei pusiausvyros linija yra tiesė, tai vidutinė varos jėga $\Delta\overline{Y}_{vid}$ apskaičiuojama pagal (5.32) arba (5.33) lygtis. Jei pusiausvyros linija ne tiesė, tai n_{0y} apskaičiuojama grafiniu arba grafinio integravimo būdu.

Tūriniu masės perdavimo koeficientu K_{yv} vadinamas dydis:

$$K_{yv} = K_y \cdot \sigma \cdot \psi = K_y \cdot a ; \tag{5.43}$$

čia $a = \sigma \cdot \psi$ – sudrėkintas (aktyvus) savitasis įkrovos paviršius plotas, m^2/m^3.

Masės perdavimo vieneto aukštį per tūrinį masės perdavimo koeficientą galima išreikšti tokia lygtimi:

$$h_{0y} = \frac{G}{K_{yv} \cdot S} = \frac{G}{K_y \cdot S \cdot \sigma \cdot \psi} . \tag{5.44}$$

b) naudojant ekvivalentišką teorinei lėkštei aukštį (*TLEA*).

Įkrovos sluoksnio aukštį galima apskaičiuoti pagal lygtį:

$$H_i = h_e \cdot n_l ; \qquad (5.45)$$

čia h_e – aukštis, ekvivalentiškas teorinės lėkštės (*TLEA*) arba teorinės pakopos (*TPA*) aukščiui, m, n_l – teorinių lėkščių skaičius.

Teorinių lėkščių – koncentracijos pasikeitimo pakopų skaičius absorberyje paprastai nustatomas grafiniu būdu (5.3 pav.). *AB* – darbo linija, sudaryta pagal (5.26) arba (5.27) lygtį, *OC* – pusiausvyros linija.

Masės perdavimo vieneto aukštis gali būti išreikštas masės perdavimo aukščiais atitinkamai dujų fazėje h_y ir skysčio fazėje h_x.

$$h_{0y} = h_y + m \cdot (G/L) \cdot h_x .$$

5. Kriterijų lygtys masės atidavimo koeficientams β skaičiuoti įkrautiniame absorberyje, esant netvarkingai supiltai įkrovai ir plėveliniam režimui.

a) dujų fazei masės atidavimo koeficientas β_d apskaičiuojamas pagal žinomą difuzinio Nu kriterijaus vertę, kuri apskaičiuojama pagal kriterijų lygtį:

$$Nu'_d = 0{,}407 \cdot Re_d^{0{,}655} \cdot (Pr'_d)^{0{,}33} . \qquad (5.46)$$

Ši lygtis tinka, kai $10 \le Re_d \le 10^4$.

čia $Nu'_d = \beta_d \cdot d_{ekv}/D_d$, $Re_d = 4 \cdot w \cdot \rho_d/(\sigma \cdot \mu_d)$, $Pr'_d = \mu_d/(\rho_d \cdot D_d)$, β_d – masės atidavimo koeficientas dujoms, m/s; D_d – absorbtyvo difuzijos koeficientas dujose, m^2/s.

Kriterijų lygtis (5.46) gali būti užrašyta masės perdavimo vieneto aukščiui pagal dujų fazę:

$$h_y/d_{ekv} = 0{,}615 \cdot Re_d^{0{,}345} \cdot (Pr'_d)^{0{,}67} . \qquad (5.47)$$

b) skysčiui masės atidavimo koeficientas β_{sk} apskaičiuojamas pagal žinomą difuzinio *Nu* kriterijaus vertę, kuri nustatoma pagal kriterijų lygtį:

$$Nu'_{sk} = 0{,}0021 \cdot Re_{sk}^{0{,}75} \cdot (Pr'_{sk})^{0{,}5} \qquad (5.48)$$

čia $Nu'_{sk} = \beta_{sk} \cdot \delta_{Tsk}/D_{sk}$, $Re_{sk} = 4 \cdot L/(S \cdot \sigma \cdot \psi \cdot \mu_{sk})$, $Pr'_{sk} = \mu_{sk}/(\rho_{sk} \cdot D_{sk})$, β_S – skysčio masės atidavimo koeficientas, m/s; $\delta_{Tsk} = \left[\mu_{sk}^2/(g \cdot \rho_{sk}^2)\right]^{1/3}$ – tariamasis skysčio plėvelės storis, m; D_{sk} – absorbtyvo difuzijos koeficientas skystyje, m^2/s; L – absorbento masės debitas, kg/s.

(5.48) lygtis gali būti užrašyta masės perdavimo vieneto aukščiui:

$$h_{sk}/\delta_{Tsk} = 119 \cdot Re_{sk}^{0,25} \cdot (Pr'_{sk})^{0,50}. \qquad (5.49)$$

Skysčiu apiplaunamas absorberio skerspjūvio perimetras gali būti išreiškiamas iš (5.38) lygties:

$$\Pi = F/H_i = S \cdot \sigma \cdot \psi. \qquad (5.50)$$

Skysčio plėvelės tekėjimo per įkrovą greitis:

$$w_{sk.pl} = L/(\rho_{sk} \cdot \Pi \cdot \delta) = L/(\rho_{sk} \cdot S \cdot \sigma \cdot \psi \cdot \delta); \qquad (5.51)$$

čia δ – vidutinis plėvelės storis, m.

Ekvivalentinis skysčio plėvelės skersmuo:

$$d_{pl} = 4 \cdot \Pi \cdot \delta/\Pi = 4 \cdot \delta. \qquad (5.52)$$

5.3. Uždavinių sprendimo pavyzdžiai

5.1. Pvz. Skysčio mišinio sudėtis molio dalimis: 29,4 % tolueno ir 70,6 % anglies tetrachlorido. Nustatyti santykinį tolueno kiekį $\overline{X}$, masės dalimis ($kg_{\text{tolueno}}/kg_{CCl4}$), ir jo koncentraciją $\overline{C}_x$, kg/m^3.

S p r e n d i m a s. Tolueno santykinė masės dalis:

$$\overline{X} = \frac{M_t \cdot x}{M_{CCl_4} \cdot (1-x)};$$

čia M_t = 92 kg/kmol – tolueno molio masė; M_{CCL4} = 154 kg/kmol – anglies tetrachlorido molio masė; x – tolueno molio (tūrio) dalis.

$$\overline{X} = \frac{92 \cdot 0,294}{154 \cdot (1-0,294)} = 0,249 \quad \frac{kg_{\,tolueno}}{kg_{\,CCl_4}}.$$

Koncentracijos $\overline{C}_x$ apskaičiavimui būtina žinoti mišinio tankį. Tankio nustatymui preliminariai apskaičiuojama tolueno koncentracija $\bar{x}$ masės dalimis.

Iš 5.2 lentelės

$$\bar{x} = \frac{\overline{X}}{1+\overline{X}} = \frac{0,249}{1+0,249} = 0,199.$$

III lentelėje parenkama 20 °C temperatūros tankis: tolueno ρ_t = 866 kg/m^3 ir anglies tetrachlorido ρ_{CCl4} = 1630 kg/m^3.

Tariame, kad skysčių maišymo metu nesikeičia mišinio tūris, t. y. mišinio tūris lygus mišinį sudarančių komponentų tūrių sumai. Tada galima apskaičiuoti mišinio savitąjį tūrį:

$0{,}199/870 + 0{,}801/1630 = 0{,}0007201$ m^3/kg;

iš čia mišinio tankis:

$$\rho_m = 1/0{,}0007201 = 1388{,}7 \text{ kg/m}^3.$$

Mišinio tankį ρ_m galima apskaičiuoti ir tokiu būdu:

$$\rho_m = \frac{1+\overline{X}}{1/\rho_t + 1/\rho_{CCl_4}} = \frac{1+0{,}249}{1/1630 + 1/870} = 1388{,}7 \text{ kg/m}^3.$$

Tolueno koncentracija:

$$\overline{C}_X = \rho_m \cdot \overline{x} = 1388{,}7 \cdot 0{,}199 = 276{,}4 \text{ kg/m}^3.$$

5.2. Pvz. 745 mm Hg slėgio ir 34 °C temperatūros oras prisotintas vandens garais. Nustatyti oro parcialinį slėgį, garų tūrio ir masės dalį oro-garų mišinyje ir jo santykinę masės dalį, imant, kad abu mišinio komponentai – idealios dujos. Taip pat apskaičiuoti oro-vandens garų mišinio tankį ir jį palyginti su sauso oro tankiu.

S p r e n d i m a s. XIV lentelėje parenkamas sočiųjų vandens garų slėgis, kai $t = 34$ °C, $p_{soč} = 5318{,}67$ Pa = 39,9 mm Hg. Šis slėgis yra lygus parcialiniam vandens garų slėgiui $p_{g,p}$ vandens garų-oro mišinyje. Oro parcialinis slėgis apskaičiuojamas pagal Daltono dėsnį:

$$p_{o,p} = P - p_{g,p} = 745 - 39{,}9 \approx 705 \text{ mm Hg}.$$

Molio (tūrio) vandens garų dalis mišinyje:

$$y = p_{g,p}/P = 39{,}9/745 = 0{,}0535.$$

Garų kiekis masės dalimis:

$$\overline{y} = \frac{M_g \cdot y}{M_g \cdot y + M_o \cdot (1-y)} = \frac{18 \cdot 0{,}0535}{18 \cdot 0{,}0535 + 29 \cdot (1 - 0{,}0339)} = 0{,}0339.$$

Santykinė masės dalis:

$$\overline{Y} = \frac{\overline{y}}{1-\overline{y}} = \frac{0{,}0339}{1-0{,}0339} = 0{,}0351 \text{ kg}_g/\text{kg}_o.$$

Oro-vandens garų mišinio tankis apskaičiuojamas kaip mišinį sudarančių komponentų tankių suma:

$$\rho_m = \rho_{o,p} + \rho_{g,p} = \frac{M_o \cdot p_{o,p} \cdot T_0}{22{,}4 \cdot T \cdot P_0} + \frac{M_g \cdot p_{g,p} \cdot T_0}{22{,}4 \cdot T \cdot P_0} =$$

$$= \frac{T_0}{22{,}4 \cdot T \cdot P_0}\left(M_o \cdot p_{o,p} + M_g \cdot p_{g,p}\right) =$$

$$= \frac{273}{22{,}4 \cdot (273+34) \cdot 760}(29 \cdot 705 + 18 \cdot 39{,}9) = 1{,}105 \text{ kg/m}^3.$$

Mišinio tankį galima apskaičiuoti ir kitu būdu.
Pradžioje apskaičiuojama mišinio molio masė:

$$M_m = M_g \cdot y + M_o \cdot (1-y) = 18 \cdot 0{,}0535 + 29 \cdot (1 - 0{,}0535) = 28{,}4 \text{ kg/kmol}.$$

Po to mišinio tankis, kai P = 745 mm Hg ir t = 34 °C

$$\rho_m = \frac{M_m \cdot P \cdot T_0}{22{,}4 \cdot P_0 \cdot T} = \frac{28{,}4 \cdot 745 \cdot 273}{22{,}4 \cdot 760 \cdot (273+34)} = 1{,}105 \text{ kg/m}^3.$$

Sauso oro tankis, esant tam pačiam slėgiui ir tai pačiai temperatūrai

$$\rho_{so} = \frac{M_o \cdot P \cdot T_0}{22{,}4 \cdot T \cdot P_0} = \frac{29 \cdot 745 \cdot 273}{22{,}4 \cdot (273+34) \cdot 760} = 1{,}13 \text{ kg/m}^3.$$

5.3. Pvz. Nustatyti amoniako difuzinių srautų tankius amoniako-oro mišinyje bei amoniako vandenyje, kai vienodu 1,9 m atstumu tarp vandens ir amoniako-oro srautų amoniako koncentracija abiejuose mišiniuose lygi: $5{,}20 \cdot 10^{-3}$ kg/m^3 ir $0{,}14 \cdot 10^{-3}$ kg/m^3. Koncentracijos kitimą imti kaip tiesinį. Oro ir vandens temperatūra 15 °C, dujų slėgis 1300 mm Hg.

Difuzinių srautų tankius ore ir vandenyje reikia palyginti su konvekcijos būdu pernešamo amoniako srauto tankiais (pagal didesnę koncentracijos vertę). Oro-amoniako mišinio ir amoniako vandens judėjimo greičiai atitinkamai lygūs: 1,80 m/s ir 0,18 m/s.

S p r e n d i m a s. Amoniako koncentracijos gradiento vertė ore ir vandenyje vienoda ir apskaičiuojama:

$$grad\overline{C} = \Delta\overline{C}/\Delta h = \left(0{,}14 \cdot 10^{-3} - 5{,}20 \cdot 10^{-3}\right)/1{,}9 = -2{,}66 \cdot 10^{-3} \text{ (kg/m}^3\text{)/m}.$$

Parenkamas amoniako difuzijos koeficientas normaliomis sąlygomis $D_0 = 17{,}0 \cdot 10^{-6}$ m^2/s. Pagal (5.20) lygtį difuzijos koeficientas perskaičiuojamas darbinėms amoniako-oro mišinio sąlygoms:

$$D_o = 17{,}0 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{760}{1300} \cdot \left(\frac{273+15}{273}\right)^{3/2} = 10{,}8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}.$$

Amoniako srauto ore tankis pagal molekulinės (5.9) difuzijos lygtį:

$$g_{d,o} = -10{,}8 \cdot 10^{-6} \cdot \left(-2{,}66 \cdot 10^{-3}\right) = 28{,}7 \cdot 10^{-9} \text{ kg/(m}^2\text{·s)}.$$

Parenkama amoniako difuzijos koeficientas 20 °C temperatūros vandenyje D_{20} = 1,8·10^{-9} m^2/s. Norint pagal (5.22) lygtį apskaičiuoti, šio koeficiento vertę 15 °C temperatūros vandenyje, pirmiausia pagal (5.23) lygtį reikia apskaičiuoti temperatūrinį koeficientą b:

$$b = 0{,}2 \cdot \sqrt{1{,}01 \cdot 10^{-3}} \,/ \sqrt[3]{1000} = 6{,}36 \cdot 10^{-4},\ \text{K}^{-1}$$

čia μ = 1,01 mPa·s ir ρ = 1000 kg/m^3 – 20 °C temperatūros vandens klampa ir tankis (I pav., III lentelė).

Tuomet $D_{15} = 1{,}8 \cdot 10^{-9} \cdot \left[1 + 6{,}36 \cdot 10^{-4} \cdot (15 - 20)\right] = 1{,}79 \cdot 10^{-9}$ m^2/s.

Difuzinio srauto vandenyje tankis apskaičiuojamas pagal (5.9) lygtį):

$$g_{d,v} = -1{,}79 \cdot 10^{-9} \cdot \left(-2{,}66 \cdot 10^{-3}\right) = 0{,}00477 \cdot 10^{-9}\,\text{kg/(m}^2\text{·s)}.$$

Amoniako difuzinio srauto vandenyje tankis mažesnis šiuo atveju $28{,}7 \cdot 10^{-9} / 0{,}00477 \cdot 10^{-9} = 6017$ kartų už amoniako difuzinio srauto tankį ore, kadangi amoniako difuzijos vandenyje koeficientas mažesnis negu ore.

Judančio srauto konvekcijos būdu pernešamo amoniako srauto tankis apskaičiuojamas pagal (5.10) lygtį:

oro srautu $g_{k,o} = 1{,}80 \cdot 5{,}20 \cdot 10^{-3} = 9{,}36 \cdot 10^{-3}$ kg/(m^2·s),

vandens srautu $g_{k,v} = 0{,}18 \cdot 5{,}20 \cdot 10^{-3} = 0{,}936 \cdot 10^{-3}$ kg/(m^2·s).

Rezultatų palyginimas rodo, kad amoniako vanduo konvekcijos būdu perneša mažiau amoniako negu oras, nes vandens srauto greitis mažesnis.

Palyginę amoniako pernešimo intensyvumus dėl konvekcijos ir dėl molekulinės difuzijos, matome, kad srauto dėl konvekcijos intensyvumas tiek ore, tiek vandenyje didesnis už srauto analogiškus intensyvumus dėl molekulinės difuzijos.

5.4. Pvz. 20 °C temperatūros ir atmosferinio slėgio oro srautas, turintis 14 % (tūrio) acetileno, liečiasi su vandens srautu. Vandens sraute ištirpę: a) 0,29·10^{-3} kg$_{act}$/kg$_v$; b) 0,167·10^{-3} kg$_{act}$/kg$_v$. Nustatyti: 1) iš kokios fazės į kokią pereis acetilenas; 2) šio proceso varos jėgą Pa, molio dalimis ir santykinėmis molio dalimis. Bendras (atmosferinis) slėgis P = 765 mm Hg. Acetileno pusiausviros koncentracijos dujų ir skysčio fazėse nustatomos pagal Henrio dėsnį.

S p r e n d i m a s. Parenkama 20 °C temperatūros acetileno tirpalui vandenyje Henrio konstantos vertė E = 0,92·10^6 mm Hg.

Parcialinis acetileno slėgis ore apskaičiuojamas pagal (5.1) lygtį:

$p = y \cdot P = 0{,}14 \cdot 765 = 107$ mm Hg.

Acetileno molio dalis x vandenyje, kai $\overline{X} = 0{,}29 \cdot 10^{-3}$ kg_{act}/kg_v apskaičiuojama pagal 5.2 lentelėje pateiktas lygtis:

$$x = \frac{\overline{X}}{\overline{X} + M_{AC}/M_V} = \frac{0{,}29 \cdot 10^{-3}}{0{,}29 \cdot 10^{-3} + 26/18} = 0{,}2 \cdot 10^{-3}.$$

Atsakymus į pavyzdžio sąlygos klausimus galima gauti dviem būdais.

1. Parcialinis acetileno slėgis dujų fazėje pusiausvyros sąlygomis virš skysčio, kuriame $x = 0{,}2 \cdot 10^{-3}$, apskaičiuojamas pagal Henrio dėsnį (5.2 lygtį):

$$p^* = E \cdot x = 0{,}92 \cdot 10^6 \cdot 0{,}2 \cdot 10^{-3} = 184 \text{ mm Hg.}$$

Kadangi $p = 107 < p^* = 184$ mm Hg, tai acetilenas juda iš vandens į orą.

Šio perėjimo proceso varos jėga:

slėgio vienetais $\Delta p = p^* - p = 184 - 107 = 77$ mm Hg = 10264,1 Pa;

molio dalimis $\Delta y = y^* - y = 184/765 - 0{,}14 = 0{,}1005$;

santykinėmis molio dalimis

$$\Delta Y = Y^* - Y = \frac{y^*}{1-y^*} - \frac{y}{1-y} = \frac{0{,}241}{1-0{,}241} - \frac{0{,}14}{1-0{,}14} = 0{,}155 \text{ } kmol_{act}/kmol_o.$$

2. Esant pusiausvyrai tarp dujų, kuriose $p = 107$ mm Hg, ir vandens, kuriame pagal Henrio dėsnį turi būti acetileno kiekis molio dalimis:

$$x^* = p/E = 107/0{,}92 \cdot 10^6 = 0{,}116 \cdot 10^{-3}.$$

Tikroji acetileno koncentracija vandenyje didesnė už pusiausvirą ($x = 0{,}2 \cdot 10^{-3}$), todėl acetilenas pereis iš vandens į orą.

Šio proceso varos jėga molio dalimis:

$$\Delta x = x - x^* = 0{,}2 \cdot 10^{-3} - 0{,}116 \cdot 10^{-3} = 0{,}084 \cdot 10^{-3},$$

santykinėmis molio dalimis

$$\Delta X = X - X^* = x/1 - x - x^*/1 - x^* =$$
$$= 0{,}2 \cdot 10^{-3} / \left(1 - 0{,}2 \cdot 10^{-3}\right) - 0{,}116 \cdot 10^{-3} / \left(1 - 0{,}116 \cdot 10^{-3}\right) =$$
$$= 0{,}084 \cdot 10^{-3} \text{ } kmol_{act}/kmol_v.$$

Acetileno molio dalis vandenyje

$$x \approx 18 \cdot 0{,}1674 \cdot 10^{-3} / 26 = 0{,}116 \cdot 10^{-3}.$$

Kadangi besiliečiančios fazės yra pusiausviros,

$$x = x^* = 0{,}116 \cdot 10^{-3}, \qquad y = y^* = 0{,}14;$$

tai acetilenas nepereis iš fazės į fazę, t. y. difuzija nevyks.

5.5. Pvz. Masės mainų aparate palaikomas 3,1 kgf/cm^2 absoliutusis slėgis. Pusiausvyros tarp dujų ir skysčio linijos lygtis $p^* = 8 \cdot 10^4 \cdot x$. Masės atidavimo koeficientai: β_y = 1,07 kmol/[m^2·h (Δy = 1)], β_x = 22 kmol/[m^2·h (Δx = 1)]. Nustatyti:

a) masės perdavimo koeficientus K_y ir K_x; b) difuzinių pasipriešinimų skystyje ir dujų fazėje santykį.

S p r e n d i m a s. Pusiausvyros lygčiai suteikiama forma:

$$y^* = m \cdot x = \frac{p^* \cdot x}{P} = \frac{8 \cdot 10^4}{3{,}1 \cdot 735} \cdot x = 35{,}1 \cdot x.$$

Apskaičiuojami masės perdavimo koeficientai:

$$K_y = \left(1/\beta_y + m/\beta_x\right)^{-1} = \left(1/1{,}07 + 35{,}1/22\right)^{-1} = 0{,}396 \ \frac{kmol}{m^2 \cdot h \cdot (\Delta y = 1)},$$

$$K_x = \left(1/m \cdot \beta_y + 1/\beta_x\right)^{-1} = \left(1/(35{,}1 \cdot 1{,}07) + 1/22\right)^{-1} = 13{,}9 \ \frac{kmol}{m^2 \cdot h \cdot (\Delta x = 1)}.$$

Patikrinimas:

$$K_x / K_y = 13{,}9/0{,}396 = 35{,}1 = m.$$

Difuzinio pasipriešinimo skystyje ir dujų fazėje santykis:

$$\frac{m}{\beta_x} : \frac{1}{\beta_y} = \frac{35{,}1}{22} : \frac{1}{1{,}07} = 1{,}71.$$

5.6. Pvz. Masės perdavimo koeficientas K_Y = 10,4 kmol/(m^2·h·kmol/m^3). Inertinės dujos – azotas. Slėgis absorberyje 760 mm Hg, temperatūra 20 °C. Perskaičiuoti masės perdavimo koeficientą K_Y nurodytais vienetais: 1) kmol/(m^2·h·(Δy = 1)), 2) kmol/(m^2·h·mm Hg), 3) kmol/(m^2·h (kg/kg$_{azoto}$)).

S p r e n d i m a s. Užrašoma masės perdavimo lygtis, kai yra įvairūs proceso varos jėgos matavimo vienetai:

$$M = K_y \cdot \Delta C_y \cdot F = K'_y \cdot \Delta y \cdot F = K''_y \cdot \Delta p \cdot F;$$

čia M – į skystį (absorbentą) pereinantis absorbtyvo debitas, kmol/h.

Iš čia:

1) $K_Y \cdot \Delta C_Y = K'_y \cdot \Delta y$ t. y. $K'_y = K_y \cdot \Delta C_y / \Delta y$.

Iš 5.2. lentelės

$$C_y = \frac{\rho}{M_m} \cdot y = \frac{P \cdot T_0}{22{,}4 \cdot P_0 \cdot T} \cdot y.$$

Šiame pavyzdyje $P = P_0$ todėl:

$$\Delta C_Y / \Delta y = T_0 / (22{,}4 \cdot T) = 273/(22{,}4 \cdot 293) = 0{,}0416,$$

$$K'_y = K_Y \cdot (\Delta C_Y / \Delta y) = 10{,}4 \cdot 0{,}0416 = 0{,}433 \quad \frac{kmol}{m^2 \cdot h \cdot (\Delta y = 1)}.$$

2) $K'_y \cdot \Delta y = K''_y \cdot \Delta p$.

Pagal (5.1) lygtį $y = p/P$, $\Delta y = \Delta p / P$,

$$K''_y = K'_y \cdot (\Delta y / \Delta p) = K'/P = 0{,}433/760 = 5{,}69 \cdot 10^{-4} \quad \frac{kmol}{m^2 \cdot h \cdot mm\,Hg} =$$

$$= \frac{5{,}69 \cdot 10^{-4}}{3600 \cdot 133{,}3} = 1{,}19 \cdot 10^{-9} \quad \frac{kmol}{m^2 \cdot s \cdot Pa}.$$

3) Iš lygties $W = M_K \cdot M = M_K \cdot K'_y \cdot \Delta y \cdot F = K'''_y \cdot \Delta \overline{Y} \cdot F$;

čia W – absorbtyvo masės debitas, kg/h.

$$K'''_y = K'_y \cdot M_K \cdot \Delta y / \Delta \overline{Y}.$$

Pagal (5.2) lentelę:

$$\overline{Y} = \frac{M_K \cdot y}{M_{ID} \cdot (1 - y)}$$

čia M_k ir $M_{i,d}$ – absorbtyvo ir inertinių dujų molių masės, kg/kmol.

Jei vertės mažos, $y << 1$:

$$\overline{Y} \approx \frac{M_k}{M_{i,d}} \cdot y.$$

Iš čia $\Delta y / \overline{Y} \approx M_{i,d} / M_k$.

$$K'''_y = K'_y \cdot \frac{M_k \cdot \Delta y}{\Delta \overline{Y}} = K'_y \cdot M_{i,d} = 0{,}433 \cdot 28 = 12{,}1 \; kg \Big/ \left(m^2 \cdot h \cdot \frac{kg}{kg_{azoto}} \right).$$

5.7. Pvz. Apskaičiuoti sieros rūgšties sąnaudas (debitą) oro džiovinimui. Absorberio našumas 500 m^3/h sauso oro, esant normalioms sąlygoms. Į absorberį įtekančio oro drėgnis 0,016 $kg/kg_{s.,o}$, iš absorberio ištekančio oro drėgnis 0,006 $kg/kg_{s.,o.}$. Į absorberį įtekančioje rūgštyje yra 0,6 $kg_v/kg_{monohidrato}$, iš absorberio ištekančioje rūgštyje yra 1,4 $kg_v/kg_{monohidrato}$. Slėgis aparate atmosferinis.

S p r e n d i m a s. Oro masės debitas:

$$G = V_h \cdot \rho = 500 \cdot 1{,}29 = 646 \text{ kg/h};$$

čia 1,29 kg/m^3 – oro tankis normaliomis sąlygomis.

Pagal (5.25) lygtį sieros rūgšties (monohidrato) sąnaudos (debitas):

$$L = G \cdot \frac{\overline{Y}_į - \overline{Y}_{iš}}{\overline{X}_{iš} - \overline{X}_į} = 646 \cdot \frac{0{,}016 - 0{,}006}{1{,}4 - 0{,}6} = 8{,}07 \text{ kg/h}.$$

5.8. Pvz. Nustatyti masės perdavimo koeficientą absorberyje, kuriame vanduo iš dujų absorbuoja CO_2. Į absorberį tiekiama 5000 m^3/h dujų mišinio (debitas nurodomas, esant atmosferiniam slėgiui, darbinei temperatūrai) ir 650 m^3/h švaraus vandens. Į absorberį tiekiamose dujose yra 28,4 (tūrio) % CO_2, o iš absorberio ištekančiose dujose 0,20 (tūrio) % CO_2. Absoliutus slėgis absorberyje p_{abs} = 16,5 kgf/cm^2. Temperatūra 15 °C. Apatinėje absorberio dalyje pakrautos 3 t (50×50×5) mm keraminių žiedų, o ant jų dar pakrauta 17 t (35×35×4) mm žiedų. Drėkinimo koeficientas lygus 1.

S p r e n d i m a s. Apskaičiuojamas suminis visų (50×50×5) mm žiedų paviršiaus plotas:

$$f_1 = G_1 \cdot \sigma_1 / \rho_1 = 3000 \cdot 87{,}5/530 = 495 \text{ m}^2;$$

čia ρ_l = 530 kg/m^3 – piltinis (50x50x5) mm žiedų tankis; σ_l = 87,5 m^2/m^3 – savitasis šios įkrovos paviršiaus plotas.

Analogiškai apskaičiuojamas (35×35×4) mm žiedų paviršiaus plotas:

$$f_2 = G_2 \cdot \sigma_2 / \rho_2 = 17000 \cdot 140/505 = 4720 \text{ m}^2.$$

Suminis visų žiedų paviršiaus plotas:

$$F = f_1 + f_2 = 495 + 4720 = 5215 \text{ m}^2.$$

Į absorberį su dujomis įtekantis CO_2 kiekis :

$$V_į = V_m \cdot y_ē = 5000 \cdot 0{,}284 = 1420 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Iš absorberio su dujomis ištekantis CO_2 kiekis:

$$V_{iš} = V_{iš,m} \cdot y_{iš} = \frac{V_{i,m} - V_i}{1 - y_{iš}} \cdot y_{iš} = \frac{5000 - 1420}{1 - 0{,}002} \cdot 0{,}002 = 7{,}2 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Vandens absorbuotas CO_2 kiekis:

$$V_{abs} = V_i - V_{iš} = 1420 - 7{,}2 = 1413 \text{ m}^3/\text{h},$$

kai $p = 1$ kgf/cm^2 ir $t = 15$ °C arba

$$G_{abs} = \frac{V_{abs} \cdot T_0}{T} \cdot \rho_0 = \frac{1413 \cdot 273}{273 + 15} \cdot 1{,}976 = 2630 \text{ kg/h} = 60 \text{ kmol/h}.$$

Apskaičiuojama proceso varos jėga absorberio apačioje, t. y. dujoms įtekant į absorberį.

Parcialinis CO_2 slėgis dujoms įtekant į absorberį:

$$p_i = P \cdot y_i = 1620 \cdot 0{,}284 = 460 \text{ kPa};$$

čia 1620 = 16,5·98,1 kPa bendras slėgis absorberyje.

Molinė CO_2 dalis iš absorberio ištekančiame vandenyje:

$$x_i = \frac{G_{CO_2}/M_{CO_2}}{G_{CO_2}/M_{CO_2} + G_{H_2O}/M_{H_2O}} = \frac{2630/44}{2630/44 + 650000/18} = 0600166.$$

15 °C temperatūros CO_2 Henrio konstanta E lygi $0{,}93 \cdot 10^6$ mm Hg arba $0{,}124 \cdot 10^6$ kPa. Iš čia parcialinis CO_2 slėgis pusiausvirose dujose su iš absorberio ištekančiu vandeniu (5.2 lygtis):

$$p_i^* = E \cdot x_{iš} = 0{,}00166 \cdot 0{,}124 \cdot 10^6 = 206 \text{ kPa};$$

$$\Delta p = p_i - p_i^* = 460 - 206 = 254 \text{ kPa}.$$

Parcialinis CO_2 slėgis iš aparato ištekančiose dujose:

$$p_{iš} = P \cdot y_{iš} = 1620 \cdot 0{,}002 = 3{,}24 \text{ kPa}.$$

Kadangi į absorberį teka grynas vanduo be CO_2, tai $p_{iš}^* = 0$, $\Delta p_{iš} = p_{iš} - p_{iš}^* = 3{,}24 - 0 = 3{,}24$ kPa.

Apskaičiuojama vidutinė proceso varos jėga absorberyje:

$$\Delta p_{vid} = \frac{254 - 3{,}24}{ln(254/3{,}24)} = 57{,}4 \text{ kPa}.$$

Masės perdavimo koeficientas

$$K_p = \frac{M}{F \cdot \Delta p_{vid}} = \frac{2630}{5212 \cdot 57{,}4} = 0{,}0088 \ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa}} \text{ arba}$$

$$K_p = \frac{M}{F \cdot \Delta p_{vid}} = \frac{2630}{5212 \cdot (57{,}4/0{,}133)} = 0{,}0012 \ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mm Hg}}.$$

5.9. Pvz. Nustatyti minimalias teorines absorbento sąnaudas iš 1000 m^3/h garų-dujų mišinio normaliomis sąlygomis, visiškai absorbuojant propaną ir butaną. Į absorberio apačią tiekiamose dujose yra 15 % (tūrio) propano ir 10 % butano. Temperatūra absorberyje 10 °C (tūrio), absoliutinis slėgis 1800 mm Hg. Butano ir propano tirpumas vandenyje aprašomas Raulio dėsniu.

S p r e n d i m a s. Maksimali propano koncentracija absorbente pusiausvirame su iš absorberio ištekančiu dujų-garų srautu apskaičiuojama pagal (5.7) lygtį:

$$x_P^* = \frac{P}{p_P} \cdot y_P = \frac{1800}{6000} \cdot 0{,}15 = 0{,}045;$$

čia p_P = 6000 mm Hg propano garų slėgis, kai jų temperatūra 10 °C.

Iš dujų mišinio reikia absorbuoti gryno propano:

$$G_P = V \cdot y_P / 22{,}4 = 1000 \cdot 0{,}15/22{,}4 = 6{,}72 \text{ kmol/h}.$$

Minimalios absorbento sąnaudos propano absorbcijai apskaičiuojamos:

$$L_{min} \cdot x_P^* / (1 - x_P^*) = G_P;$$

$$L_{min} = G_P \cdot (1 - x_P^*) / x_P^* = 6{,}72 \cdot (1 - 0{,}045)/0{,}045 = 142 \text{ kmol/h}.$$

Maksimali galima butano koncentracija iš absorberio ištekančiame absorbente gali būti apskaičiuota:

$$x_B^* = \frac{P}{p_B} \cdot y_B = \frac{1800}{1200} \cdot 0{,}10 = 0{,}15;$$

čia p_P = 1200 mm Hg 10 °C temperatūros butano sočiųjų garų slėgis.

Maksimalus butano kiekis, kurį reikia absorbuoti:

$$G_B = V \cdot y_B / 22{,}4 = 1000 \cdot 0{,}10/22{,}4 = 4{,}47 \text{ kmol/h}.$$

Minimalus absorbento kiekis visiškai butano absorbcijai:

$$L_{min} = G_B \cdot (1 - x_B^*) / x_B^* = 4{,}47 \cdot (1 - 0{,}150)/0{,}150 = 25{,}4 \text{ kmol/h}.$$

Minimalus absorbento kiekis visiškai butano absorbcijai 142/25,4 = 5,60 karto mažesnis negu propano absorbcijai. Iš gautų rezultatų galima padaryti išvadą, kad anksčiau apskaičiuoto absorbento kiekio propano absorbcijai (142 kmol/h) pakaks ir butano absorbcijai.

5.10. Pvz. Apskaičiuoti masės atidavimo koeficientą β_d dujų fazei įkrautiniame absorberyje. Absorberyje iš N_2 absorbuojamas SO_2. Temperatūra 20 °C, slėgis atmosferinis, fiktyvus dujų greitis 0,35 m/s. Absorberis užpildytas kokso gabaliukais ($\sigma = 42$ m^2/m^3 ir $V_{lais} = 0{,}58$ m^3/m^3). Absorbentas įkrovos paviršiumi teka plėveliniu režimu.

S p r e n d i m a s. Nu_D^* kriterijaus apskaičiavimui pagal (5.46) lygtį pirmiausia reikia apskaičiuoti Re_d:

$$Re_d = 4 \cdot w \cdot \rho_d / (\sigma \cdot \mu) = 4 \cdot 0{,}35 \cdot 1{,}16 / (42 \cdot 0{,}0175 \cdot 10^{-3}) = 2210;$$

čia $\rho_d = 28 \cdot 273 \cdot 1 / (22{,}4 \cdot (273 + 20) \cdot 1) = 1{,}16$ kg/m^3; $\mu_d = 0{,}175 \cdot 10^{-3}$ Pa·s (II pav.).

SO_2 difuzijos azote koeficientas D_d lygus jo difuzijos koeficientui ore:

$$D_d = 10{,}3 \cdot 10^{-6} \cdot (293/273)^{1,5} = 11{,}45 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$Pr_d^* = \mu_d / (\rho_d \cdot D_d) = 0{,}0175 \cdot 10^{-3} / (1{,}16 \cdot 11{,}45 \cdot 10^{-6}) = 1{,}32.$$

Pagal (5.46) lygtį apskaičiuojama difuzinio Niuselto kriterijaus vertė:

$$Nu_d^* = 0{,}407 \cdot Re_d^{0,655} \cdot Pr_d^{*0,33} = 0{,}407 \cdot 2210^{0,655} \cdot 1{,}32^{0,33} = 69{,}1.$$

Masės atidavimo koeficientas:

$$\beta_d = Nu_d^* \cdot D_d / d_{ekv} = 69{,}1 \cdot 11{,}45 \cdot 10^{-6} / 0{,}055 = 144 \cdot 10^{-4} \text{ m/s};$$

čia $d_{ekv} = 4 \cdot V_{lais} / \sigma = 4 \cdot 0{,}58/42 = 0{,}055$ m įkrovos ekvivalentinis skersmuo.

5.4. Kontroliniai uždaviniai

5.1. Mišinį sudaro benzenas ir nitrobenzenas. Nitrobenzeno tūrio dalis mišinyje kinta nuo 0,15 iki 0,55. Apskaičiuoti mišinio tankio priklausomybę nuo nitrobenzeno koncentracijos kg_{nb}/kg_b ir $mol_{nb}/m^3_{miš}$. Imama, kad mišinio tūris lygus mišinį sudarančių komponentų tūrių sumai. Sprendimo rezultatus pavaizduoti grafiškai.

5.2. Mišinys susideda iš 25 % (mol) chloroformo, 55 % (mol) tolueno ir 20 % (mol) anglies sulfido. Apskaičiuoti skysčių mišinio tankį, jei mišinio tūris maišant nekinta.

5.3. Skystį sudaro chloroformas, acetonas ir anglies sulfidas. Apskaičiuoti nurodytos sudėties (molio procentais) mišinio tankį bei nurodytų dviejų komponentų kiekio mišinyje kitimo įtaką mišinio tankiui (trečiojo komponento kiekis pastovus). Antrąją sprendimo dalį pavaizduoti grafiškai.

5.4. Oras prisotintas etanolio garais. Suminis oro-garų mišinio slėgis 600 mm Hg, temperatūra 60 °C. Imama, kad abu mišinio komponentai – idealios dujos. Apskaičiuoti etanolio garų koncentraciją masės dalimis $\overline{Y}$ ir mišinio tankį.

5.5. Dujų mišinį sudaro 26 % (mol) vandenilio, 60 % (mol) metano ir 14 % etileno. Mišinio slėgis p_{abs} = 30 kgf/cm^2, temperatūra 20 °C. Imant, kad mišinio komponentai – idealios dujos, apskaičiuoti jų koncentracijas $\overline{C}_x$, kg/m^3.

5.6. Virš plokščio vandens garų sorbento paviršiaus 2,1 m/s greičiu (normaliomis sąlygomis) juda oro-vandens garų mišinys. Garų koncentracija absorbcijos pradžioje $12 \cdot 10^{-3}$ kg/m^3. Absorbento paviršiaus plotis 0,5 m, ilgis 2 m. Oro-vandens garų mišinys tiekiamas per 100 mm aukščio plyšį. Vidutinis pasienio sluoksnio prie paviršiaus storis 0,40 mm, skersai paviršiaus difunduoja vandens garai. Apskaičiuoti absorbuotą garų kiekį, kai garų koncentracija ant pačio absorbento paviršiaus lygi nuliui, koncentracijos pasiskirstymas išilgai mišinio judėjimo – tiesinis. Skaičiuoti nuoseklaus priartėjimo metodu.

5.7. Naudojant (5.4. Pvz.) sąlygos duomenis apskaičiuoti masės perdavimo proceso varos jėgą pagal koncentracijas dujų ir skysčio fazėse. Koncentracijos išreikštos masės vienetais (kg ir kilomoliais).

5.8. Binarinis mišinys, kuriame 50 % chloroformo ir 50 % (masės) benzeno, liečiasi su skysčiu, kuriame 44 % chloroformo ir 56 % benzeno (molio dalimis), slėgis atmosferinis. Nustatyti: a) iš kokios fazės į kokią pereis chloroformas ir benzenas, b) masės perdavimo proceso varos jėgą pagal garų ir skysčio fazę, įtekant garams į skystį (molio dalimis). Duomenis apie nagrinėjamos sistemos pusiausvyrą parinkti žinynuose.

5.9. Dujų mišinys, kuriame yra 0,8 % (tūrio) oktano, suslegiamas iki p_{abs} = 5 kgf/cm^2 ir aušinamas iki 25 °C. Nustatyti: a) oktano išskyrimo laipsnį, b) išskyrimo laipsnio pasikeitimą, kai mišinys bus ataušinamas iki 0 °C. Oktano sočiųjų garų slėgį parinkti žinynuose.

5.10. Apskaičiuoti molekulinės difuzijos koeficientus, kai slėgis atmosferinis: a) benzeno garų tolueno garuose, kai t = 95 °C; b) etanolio garų vandens garuose, kai t = 90 °C.

5.11. Apskaičiuoti masės perdavimo koeficientą vandeniu laistomame absorberyje, kuriame $\beta_y = 2{,}76 \cdot 10^{-3}$ kmol /(m^2·kPa), o $\beta_x = 1{,}17 \cdot 10^{-4}$ m/s. Slėgis aparate p_{abs} = 1,07 kgf/cm^2. Pusiausvyros lygtis $Y^* = 102 \cdot X$ (molio dalimis).

5.12. Nustatyti vidutinę varos jėgą ir bendrą masės perdavimo vienetų skaičių n_{0y}, kai tepalas iš dujų absorbuoja benzeno garus, kurių koncentracija 4 % (tūrio), kai dujos įteka į absorberį. Absorbuojama 80 % pradinio benzeno kiekio. Benzeno koncentracija iš absorberio ištekančiame tepale 0,02 $kmol_b/kmol_{šv.t.}$. Į absorberį įtekančiame tepale benzeno nėra. Pusiausvyros lygtis $Y^* = 0{,}126 \cdot X$ (molio dalimis). Varos jėgą išreikšti $kmol_b/kmol_{in.dujų}$.

5.13. Absorberyje, esant 1 kgf/cm^2 slėgiui, vanduo iš azoto absorbuoja SO_2 priemaišas. Į absorberį tiekiamose dujose yra 5 % (tūrio) SO_2. Vandens temperatūra 20 °C, jo sąnaudos 20 % didesnės už teorines, jis absorbuoja 90 % į absorberį tiekiamo SO_2 kiekio. Apskaičiuoti: 1) vandens sąnaudas, kai absorbuojama 1000 kg/h SO_2; 2) vidutinę proceso varos jėgą, MPa; 3) bendrą perdavimo vienetų skaičių n_{0y}. Pusiausvyros linija yra tiesė, kurios vieno taško koordinatės: parcialinis SO_2 slėgis dujose $p_p = 39$ mm Hg, $\overline{X} = 0{,}007\ kg_{SO2}/kg_{vandens}$.

5.14. Įkrautiniame skruberyje, esant 1 kgf/cm^2 slėgiui ir vidutinei 25 °C temperatūrai, vanduo iš dujų absorbuoja metanolio garus. Į skruberį įtekančių dujų 1 m^3 (darbinėmis sąlygomis) yra 100 g metanolio garų. Iš skruberio ištekančiame vandenyje yra 67 % metanolio, kuris būtų su į skruberį įtekančiomis dujomis pusiausvirame vandenyje. Metanolio tirpumo vandenyje lygtis $Y^* = 1{,}15 \cdot X$. Absorbuojama 98 % į skruberį patekusio metanolio garų kiekio. Perdavimo koeficientas $K_x = 0{,}50\ kmol/(m^2 \cdot h \cdot mol_{met}/kmol_{vand})$. Inertinių dujų debitas 1400 m^3/h (darbinėmis sąlygomis). Įkrova – keramikos žiedai, kurių savitasis paviršius 190 m^2/m^3. Įkrovos drėkinimo koeficientas $\psi = 0{,}87$. Fiktyvus dujų greitis absorberyje $w = 0{,}45$ m/s. Apskaičiuoti vandens sąnaudas ir reikalingą įkrovos sluoksnio aukštį.

5.15. Į 0,5 m skersmens skruberį tiekiama 550 m^3/h 760 mm Hg slėgio ir 20 °C temperatūros oro, turinčio 2,8% (tūrio) amoniako, kuris absorbuojamas, esant 1 kgf/cm^2 slėgiui. Absorbcijos laipsnis 0,95. Vandens sąnaudos 40 % didesnės už teorines. Apskaičiuoti: 1) vandens sąnaudas; 2) bendrą perdavimo vienetų skaičių n_{0y}; 3) (50×50×5) mm keramikos žiedų įkrovos sluoksnio aukštį. Masės perdavimo koeficientas $K_y = 0{,}001\ kmol_{NH3}/(m^2 \cdot s \cdot mol_{NH3}/kmol_{oro})$ Duomenis apie skysčio ir dujų sudėtis pusiausvyros sąlygomis imti iš 5.11. Pvz. Įkrovos drėkinimo koeficientas $\psi = 0{,}9$.

5.16. Oras su amoniako priemaišomis prateka pro vandeniu laistomą skruberį, užpildytą 89,5 m^2/m^3 savitojo paviršiaus žiedais. Įkrovos laisvasis tūris 0,79 m^3/m^3. Absorbcijos proceso temperatūra 25 °C, absoliutinis slėgis 1,0 kgf/cm^2. Vidutinė amoniako koncentracija dujose 5,8 % (tūrio) Dujų vidutinis greitis pagal tuščio skruberio skerspjūvį 1,1 $kg/(m^2 \cdot s)$. Apskaičiuoti dujų masės atidavimo koeficientą, kai skruberis dirba plėveliniu režimu.

5.17. Apskaičiuoti skysčio masės atidavimo koeficientą absorberyje, kuriame 20 °C temperatūros vanduo absorbuoja CO_2. Laistymo tankis 60 $m^3/(m^2 \cdot h)$. Įkrova – netvarkingai supilti (35×35×4) mm keramikos žiedai. Įkrovos drėkinimo koeficientas $\psi = 0,9$.

5.18. Apskaičiuoti masės atidavimo koeficientą, absorbuojant dujas plėveliniu režimu skruberyje, kai iš koksavimo dujų absorbuojamas benzenas pagal tokius duomenis: įkrova strypinė (12,5×100) mm, atstumas tarp strypelių $b = 25$ mm (čia $d_e = 2b = 0,05$ m), pagal tuščio absorberio skerspjūvį apskaičiuotas dujų (fiktyvus) greitis 0,95 m/s, dujų tankis 0,50 kg/m^3, dinaminė klampa 0,013 mPa·s, benzeno difuzijos dujose koeficientas $D = 16 \times 10^{-6}$ m^2/s.

6 dalis. DŽIOVINIMAS

Drėgmės pašalinimo iš medžiagos procesas vadinamas džiovinimu. Chemijos ir maisto bei kitose pramonės šakose džiovinimo procesas plačiai taikomas, kai medžiagoje esanti drėgmė blogina jos fizikines chemines savybes, kai drėgmę būtina šalinti dėl tolesnio medžiagos apdorojimo ypatumų ar tiesiog kai norima sumažinti transporto išlaidas. Džiovinamos ne tik kietos drėgnos medžiagos, bet ir suspensijos, kuriose drėgmės yra gerokai daugiau nei kietosios medžiagos.

Medžiagose esanti drėgmė gali būti pašalinta šiais metodais: 1) *mechaniniais* (presuojant, filtruojant, centrifuguojant ir kt.), 2) *fizikiniais cheminiais* (sugeriant drėgmę higroskopinėmis medžiagomis, pvz., kalcio chloridu, sieros rūgštimi), 3) *šiluminiais* (išgarinant drėgmę ir garus pašalinant nuo medžiagos paviršiaus).

Mechaninis drėgmės pašalinimo metodas yra paprasčiausias ir pigiausias, tačiau po jo medžiagoje neišvengiamai lieka šiek tiek drėgmės. Fizikinis cheminis metodas dažniausiai taikomas, kai norima, kad išdžiovinta medžiaga, ilgiau laikoma patalpoje, neadsorbuotų iš aplinkos drėgmės. Plačiausiai tiek buityje, tiek pramonėje naudojamas šiluminis metodas, kuris ir nagrinėjamas šioje dalyje. Džiovinamajai medžiagai šilumą galima perduoti konvekciniu, radiaciniu, kontaktiniu ir mišriuoju (konvekciniu-radiaciniu) būdais.

Džiovinimo proceso metu iš kietos medžiagos pašalinama ne tik drėgmė, bet ir prie jos paviršiaus susikaupę garai. Medžiagai džiūstant, vyksta difuzinis procesas, t. y. drėgmė garuoja (difunduoja) nuo medžiagos paviršiaus į aplinką ir difunduoja iš vidinių sluoksnių į paviršių.

Konvekciniu būdu medžiaga džiovinama sauso (šilto) oro arba dūmų srautu. Džiovinimo agentas perduoda dalį savo šilumos džiovinamajai medžiagai, todėl suintensyvėja drėgmės garavimo procesas, o susidarę vandens garai su tuo pačiu srautu pašalinami į aplinką.

6.1. Pagrindiniai dėsningumai ir skaičiavimų lygtys

1. Medžiagos drėgnis gali būti išreikštas procentais arba masės vieneto dalimis (m.v.d.) nuo bendro drėgnos medžiagos kiekio – santykinis medžiagos drėgnis (ω_s), arba nuo absoliučiai sausos medžiagos masės – absoliutusis medžiagos drėgnis (ω_a). Ryšis tarp absoliučiojo ir santykinio medžiagos drėgnio, %, išreiškiamas lygtimis:

$$\omega_a = \frac{100 \cdot \omega_s}{(100 - \omega_s)}, \quad \omega_s = \frac{100 \cdot \omega_a}{(100 + \omega_a)}. \qquad (6.1)$$

2. Medžiagoje esantį drėgmės kiekį W, kg/s, galima apskaičiuoti pagal lygtį:

- kai drėgnis išreiškiami masės vieneto dalimis

$$W_{1,(2)} = G_{abs} \cdot \omega_{a,1,(2)} = G_{1,(2)} \cdot \omega_{s,1,(2)}; \qquad (6.2)$$

- kai drėgnis išreiškiami procentais

$$W_{1,(2)} = G_{1,(2)} \cdot \frac{\omega_{s,1,(2)}}{100} = G_{abs} \cdot \frac{\omega_{a,1,(2)}}{100}. \qquad (6.2a)$$

3. Drėgnoje medžiagoje esantis absoliučiai sausos medžiagos kiekis G_{abs}, kg/s, apskaičiuojamas pagal (6.3) lygtį:

$$G_{abs} = G_{1,(2)} \cdot (1 - \omega_{s,1,(2)}); \qquad (6.3)$$

$$G_{abs} = G_{1,(2)} \cdot \frac{100 - \omega_{s,1,(2)}}{100}. \qquad (6.3a)$$

4. Džiovinimo metu iš medžiagos pašalintas drėgmės kiekis W, kg/s, (džiovyklos našumas pagal išgarintą drėgmės kiekį) apskaičiuojamas pagal (6.4) lygtį:

$$W = W_1 - W_2 = G_1 - G_2; \qquad (6.4)$$

$$W = G_{abs} \frac{\omega_{a,1} - \omega_{a,2}}{100} = G_1 \frac{\omega_{s,1} - \omega_{s,2}}{100 - \omega_{s,2}} = G_2 \frac{\omega_{s,1} - \omega_{s,2}}{100 - \omega_{s,1}}; \qquad (6.4a)$$

šiose lygtyse W_1, W_2, W – atitinkamai su džiovinama medžiaga patenkantis, su išdžiovinta medžiaga pašalinamas ir džiovinimo metu iš drėgnos medžiagos į džiovinantį agentą pereinantis drėgmės kiekis, kg/s; G_1, G_2, G_{abs}, – džiovyklos našumas atitinkamai pagal džiovinamą, pagal išdžiovintą, pagal absoliučiai sausą medžiagą, kg/s; $\omega_{s,1}$, $\omega_{s,2}$ – pradinis džiovinamos ir išdžiovintos medžiagos santykinis drėgnis, %; $\omega_{a,1}$, $\omega_{a,2}$ – džiovinamos ir išdžiovintos medžiagos absoliutusis drėgnis, %.

5. Garų (drėgmės) kiekis x**, kg/kg, dujų-vandens garų mišinyje** apskaičiuojamas pagal (6.5) lygtį:

$$x = \frac{M_g}{M_d} \cdot \frac{p_p}{P - p_p}; \qquad (6.5)$$

čia M_g, M_d – vandens garų, dujų (oro) molekulinė masė, kg/kmol; P – dujų-vandens garų mišinio bendras slėgis, Pa; p_p – vandens garų parcialinis slėgis, Pa.

6. Oro (džiovinančio agento) drėgnis x**,** $kg_d/kg_{s.o}$ apskaičiuojamas pagal (6.6) lygtį:

$$x = 0{,}622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_s}{P - \varphi \cdot p_s}; \qquad (6.6)$$

čia 0,622 – vandens garų ir oro molekulinių masių santykis; φ – santykinis oro drėgnis, vieneto dalimis, parenkamas psichrometrinėse lentelėse (9.1), žinant sauso ir drėgno termometrų rodmenis.

Kai slėgyje P drėgno oro temperatūra aukštesnė už oro prisotinimo vandens garais temperatūrą, tai $p_s = P$ ir oro drėgnis apskaičiuojamas:

$$x = 0{,}622 \cdot \frac{\varphi}{1-\varphi}. \qquad (6.7)$$

7. Drėgno oro entalpija h, J/kg$_{s.o}$, apskaičiuojama pagal lygtį:

$$h = (c_o + c_g \cdot x) \cdot t + r_0 \cdot x = (1{,}01 + 1{,}97 \cdot x) \cdot t + 2493 \cdot x \qquad (6.8)$$

čia c_o = 1,01 J/(kg·K) – sauso oro vidutinė savitoji šiluma, esant pastoviam slėgiui; c_g = 1,97 J/(kg·K) – vidutinė vandens garų savitoji šiluma; x – oro drėgnis, kg$_d$/kg$_{s.o}$; t – oro temperatūra, °C; r_0 = 2493 kJ/kg – 0 °C temperatūros vandens garavimo šiluma.

8. Drėgno oro rasos taško temperatūra t_r atitinka oro soties vandens garais būseną (φ = 1), kuri pasiekiama aušinant oro-vandens garų mišinį ($x = const$) ir gali būti nustatoma grafiškai diagramoje (Ramzino h–x) arba apskaičiuojama pagal (6.6) lygtį.

9. Drėgno oro drėgno termometro temperatūra t_d nustatoma išsprendus lygčių sistemą (6.9):

$$x = 0{,}622 \frac{p_s(t_d)}{P - p_s(t_d)}; \qquad (6.9)$$

$$(c_{oro} + c_g \cdot x) \cdot t + r_0 \cdot x = (c_{oro} + c_g \cdot x_{s.o.}) \cdot t_d + r_0 \cdot x_{soč}.$$

10. Ryšys tarp drėgno oro parametrų x, t, φ, h, p_p lengvai nustatomas pagal Ramzino h–x diagramą (6.1 pav.), kurią naudojant sprendžiami konvekcinio džiovinimo oru bei dūmais statikos uždaviniai.

11. Drėgno oro tankis $\rho_{d.o}$, kg/m^3, apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$\rho_{d.o} = \rho_{s.o.} \rho_g; \qquad (6.10)$$

čia $\rho_{s.o.}$ ir ρ_g – sauso oro ir vandens garų tankiai apskaičiuoti pagal savo parcialinius slėgius, naudojant (6.11) ir (6.12) lygtis:

$$\rho_{s.o.} = \frac{M_o}{22{,}4} \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{P - \varphi \cdot p_s}{P_0}; \qquad (6.11)$$

$$\rho_g = \frac{M_g}{22{,}4} \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{\varphi \cdot p_s}{P_0}; \qquad (6.12)$$

čia $P_0 = 0{,}1013$ MPa, $T_0 = 273$ K – oro slėgis ir temperatūra normaliomis sąlygomis.

Iš (6.10)–(6.12) lygčių gauname išplėstą drėgno oro tankio skaičiavimo lygtį:

$$\rho_{d.o.} = \frac{M_o \cdot T_0 \cdot P}{22{,}4 \cdot T \cdot P_0}\left[1 - (1 - \frac{M_g}{M_o}) \cdot \frac{\varphi \cdot p_s}{P}\right] = \qquad (6.13)$$

$$= 1{,}293 \cdot \frac{273 \cdot P}{T \cdot 101300} \cdot (1 - 0{,}378 \cdot \frac{\varphi \cdot p_s}{P}).$$

12. Drėgno oro savitasis tūris $v_{d.o.}$, $m^3/kg_{s.o}$, apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$v_{d.o.} = \frac{R \cdot T}{P - \varphi \cdot p_s}; \qquad (6.14)$$

čia R – dujų konstanta orui, lygi 287 J/(kg·K); T – oro temperatūra, K; P – suminis oro ir vandens garų mišinio slėgis, Pa; $\varphi \cdot p_{soč} = p_p$ – parcialinis vandens garų slėgis, Pa.

13. Sauso oro sąnaudos džiovykloje L, $kg_{s.o.}/s$:

$$L = W \cdot l; \qquad (6.15)$$

čia W – džiovyklos našumas pagal išgarintą drėgmės kiekį, kg/s; l – savitosios sauso oro sąnaudos, t. y. oro kiekis, reikalingas vienam kilogramui drėgmės išgarinti, $kg_{s.o.}/kg_d$.

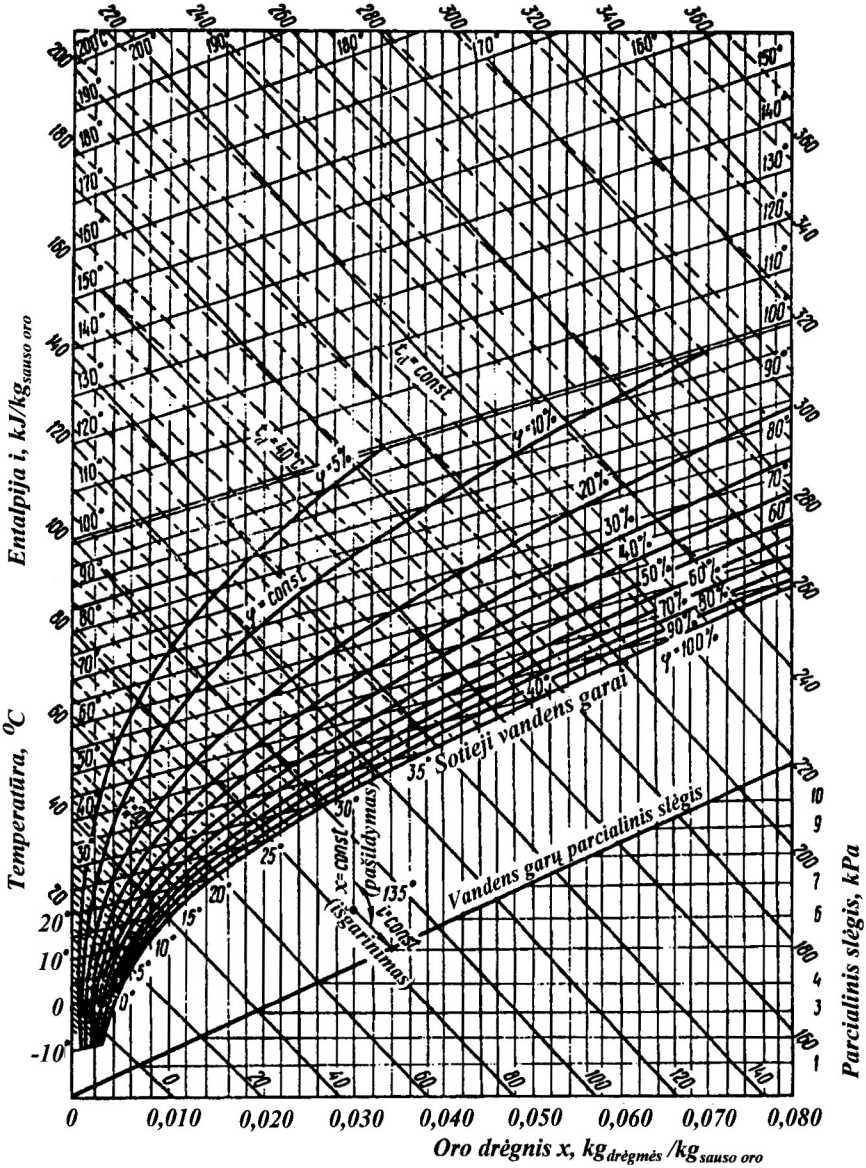
$$l = \frac{1}{x_2 - x_0}; \qquad (6.16)$$

čia x_0 ir x_2 – oro drėgnis, jam įtekant į džiovyklos kaloriferį ir ištekant iš džiovinimo kameros.

6.1 lentelė. Psichrometrinė lentelė pagal drėgną termometrą

t_d	Sauso ir drėgno termometrų parodymų												
°C	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
0	100	90	81	73	64	57	50	43	36	31	26	20	16
1	100	90	82	74	66	59	52	45	39	33	29	23	19
2	100	90	83	75	67	61	57	47	42	35	31	26	23
3	100	90	83	76	69	63	56	49	44	39	34	29	20
4	100	91	84	77	70	64	57	51	46	41	36	32	28
5	100	91	85	78	71	65	59	54	48	43	39	34	30
6	100	92	85	78	72	68	61	56	50	45	41	35	33
7	100	92	86	79	73	67	62	57	52	47	43	39	35
8	100	93	86	80	74	68	63	58	54	49	45	41	37
9	100	93	86	81	75	70	65	60	55	51	47	43	39
10	100	94	87	82	76	71	66	61	57	53	48	45	41
11	100	94	88	82	77	72	67	62	58	55	50	47	43
12	100	94	88	82	78	73	68	63	59	56	52	48	44
13	100	94	88	84	78	73	68	63	59	57	53	50	46
14	100	94	89	83	79	74	70	66	62	58	54	51	47
15	100	94	89	84	80	75	71	67	63	59	55	52	49
16	100	95	90	84	80	75	72	67	64	60	57	53	50
17	100	95	90	84	81	76	73	68	65	61	58	54	52
18	100	95	90	85	81	76	74	69	66	62	59	56	53
19	100	95	91	85	82	77	74	70	66	63	60	57	54
20	100	95	91	86	82	78	75	71	67	64	61	58	55
21	100	95	91	86	83	79	75	71	68	65	62	59	56
22	100	95	91	87	83	79	76	72	69	65	63	60	57
23	100	96	91	87	83	80	76	72	69	66	63	61	58
24	100	96	92	88	84	80	77	73	70	67	64	62	59
25	100	96	92	88	84	81	77	74	70	68	65	63	59
26	100	96	92	88	85	81	78	75	72	69	66	63	61
27	100	96	92	89	85	82	78	75	72	69	67	64	61
28	100	96	92	89	85	82	79	76	73	70	67	65	62
29	100	96	93	89	86	82	79	76	73	70	68	65	63
30	100	96	93	89	86	83	79	76	74	71	68	65	63
31	100	96	93	89	86	83	79	76	74	71	68	65	63
32	100	96	93	89	86	83	79	76	74	71	68	65	63
33	100	96	93	89	86	83	79	76	74	71	68	66	64
34	100	96	93	89	86	83	79	76	74	71	69	67	65
35	100	96	93	89	86	83	79	76	74	72	70	68	66
36	100	96	93	89	86	83	80	77	75	72	70	68	66
37	100	96	93	89	86	83	81	79	77	74	72	69	67
38	100	96	93	90	87	84	82	79	77	74	72	69	67
39	100	96	93	90	88	85	82	80	77	75	72	70	68
40	100	97	94	91	88	85	83	80	78	75	73		
41	100	97	94	91	88	85	83	80	78				
42	100	97	94	91	88	85	83						
43	100	97	94	91	88								
44	100	97	94										
45	100												

skirtumas t_s - t_d													
6,5	**7**	**7,5**	**8**	**8,5**	**9**	**9,5**	**10**	**10,5**	**11**	**11,5**	**12**	**12,5**	**13**
11	7	3											
16	11	7											
18	14	10											
21	17	13	10										
24	20	16	14	11									
27	23	19	17	13	10								
29	25	22	19	16	13	10							
31	28	25	22	18	15	12	10						
33	30	27	25	21	18	15	14						
35	32	29	27	24	21	18	17						
38	34	31	28	26	23	21	19						
40	36	33	30	28	25	23	20						
42	38	35	32	30	27	25	22	21					
43	40	37	34	32	29	27	24	23	21	19			
45	41	39	36	34	31	29	26	25	23	21	20		
46	43	41	37	35	33	31	28	27	25	23	21	19	
48	44	42	39	37	34	32	30	28	26	24	23	21	20
49	46	44	40	39	36	34	31	30	28	26	25	23	21
50	47	45	42	40	37	35	33	31	30	28	26	24	23
51	48	46	43	41	39	37	34	33	31	29	28	26	24
53	49	47	44	43	40	37	36	34	32	31	29	27	26
54	51	49	46	44	41	39	37	36	34	32	30	29	27
55	52	50	47	45	42	40	38	37	35	33	32	30	29
56	53	51	48	46	43	41	39	38	36	35	33	31	30
56	53	52	49	47	44	42	40	39	37	36	34	32	31
58	54	52	50	47	45	44	42	40	38	37	35	34	32
58	56	53	51	49	47	45	43	41	40	38	36	35	33
59	56	54	52	50	48	46	44	42	41	39	37	36	34
60	57	55	53	51	49	47	45	43	41	40	38	37	35
61	58	55	54	52	50	48	46	45	43	42	40	39	37
61	58	55	54	52	50	49	48	46	44	43	41	39	38
61	59	57	55	53	51	50	48	47	45	43	42	40	39
62	60	58	56	54	52	50	49	47	46	44	43		
63	61	59	57	55	53	51	50	48	46				
64	62	60	58	56	54	52	50						
64	62	60	58	56	55								
65	63	61	59										
65	63												

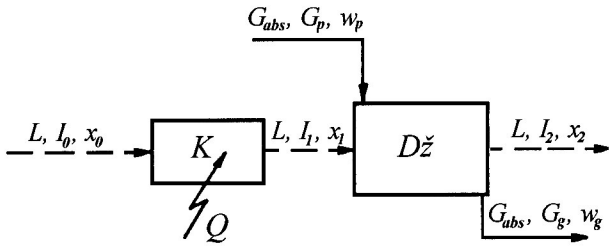


6.1 pav. Drėgno oro *h-x* diagrama, esant 99,4 kPa barometriniam slėgiui

14. Šilumos sąnaudų džiovyklos kaloriferyje srautas Φ, W, apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$\Phi = L \cdot (h_1 - h_0) \text{ W}; \tag{6.17}$$

čia h_0 ir h_1 – į kaloriferį įtekančio ir iš jo ištekančio oro entalpija, J/kg$_{s.o.}$



6.2 pav. Pagrindinė (paprastojo) džiovinimo schema:
K – kaloriferis, $Dž$ – džiovykla

Džiovyklos, dirbančios pagal pagrindinę džiovinimo schemą, šilumos balanso lygtis užrašoma taip:

$$\Phi = L \cdot (h_2 - h_0) + \sum \Phi_s \; ; \tag{6.18}$$

čia h_2 – iš džiovinimo kameros ištekančio oro entalpija, J/kg$_{s.o.}$; $\sum \Phi_s$ – šilumos sąnaudų medžiagai ir transporto priemonėms pašildyti bei šilumos nuostolių į aplinką srautai, W.

Teorinės džiovyklos atveju h_2=h_1, todėl (6.18) lygtis gali būti užrašoma taip:

$$\Phi_t = L \cdot (h_2 - h_0) . \tag{6.19}$$

15. Savitosios šilumos sąnaudos realioje džiovykloje q, J/kg$_{dr\ išgar}$, apskaičiuojamos pagal lygtį:

$$q = \frac{\Phi}{W} = \frac{h_1 - h_0}{x_2 - x_0} = l \cdot (h_1 - h_0) . \tag{6.20}$$

Teorinės džiovyklos atveju ($h_2 = h_1$), kai džiovinimo sąlygos tos pačios, savitosios šilumos sąnaudos q_t apskaičiuojamos pagal lygtį:

$$q_t = \frac{\Phi}{W} = \frac{h_2 - h_0}{x_2 - x_0} = l \cdot (h_2 - h_0) . \tag{6.21}$$

Skirtumas tarp savitųjų šilumos sąnaudų realioje ir teorinėje džiovykloje vadinamas papildomomis savitosiomis šilumos sąnaudomis ir žymimas Δ, J/kg$_{dr\ išgar}$:

$$q - q_t = \frac{h_1 - h_2}{x_2 - x_0} = \Delta . \qquad (6.22)$$

Kai džiovinimo kamera papildomai nešildoma:

$$\Delta = \frac{\sum \Phi}{W} = q_m + q_{tr} + q_n - c_{dr} \cdot t_{m,1} . \qquad (6.23)$$

Kai džiovinimo kamera papildomai šildoma:

$$\Delta = \frac{\sum \Phi}{W} = q_m + q_{tr} + q_n - c_{dr} \cdot t_{m,1} - q_p . \qquad (6.24)$$

Šilumos sąnaudos medžiagai pašildyti, išgarinus 1 kg drėgmės q_m, J/kg$_{dr\ išgar}$, apskaičiuojamos:

$$q_m = \frac{\Phi_m}{W} = \frac{G_2}{W} \cdot c_2 \cdot (t_{m,2} - t_{m,1}) . \qquad (6.25)$$

Šilumos sąnaudos medžiagai pašildyti Φ_m, W:

$$\Phi_m = c_1 \cdot G_1 \cdot t_{m,2} - c_2 \cdot G_2 \cdot t_{m,1} = \\ = c_2 \cdot G_2 \cdot (t_{m,2} - t_{m,1}) - W \cdot c_d t_{m,1} . \qquad (6.26)$$

Savitosios šilumos sąnaudos transporto priemonėms pašildyti q_{tr}, J/kg$_{dr\ išgar}$:

$$q_{tr} = \frac{\Phi_{tr}}{W} = \frac{G_{tr}}{W} \cdot c_{tr} \cdot (t_{tr,2} - t_{tr,1}) . \qquad (6.27)$$

Savitieji šilumos nuostoliai į aplinką, išgarinant 1 kg drėgmės, q_n, J/kg$_{dr}$:

$$q_n = \frac{\Phi_n}{W} = K \cdot F \cdot \Delta t . \qquad (6.28)$$

Džiovinimo kameroje 1 kg drėgmės išgarinti papildomai suteikta šiluma q_p, J/kg$_{dr}$:

$$q_p = \frac{\Phi_p}{W} ; \qquad (6.29)$$

šiose lygtyse c_1, c_2, c_{tr}, c_d – atitinkamai džiovinamos, išdžiovintos medžiagos, transporto priemonių, drėgmės (vandens) savitoji šiluma, J/(kg·K); $t_{m,1}$, $t_{m,2}$, $t_{tr,1}$, $t_{tr,2}$ – į džiovyklą tiekiamos (džiovinamos), išdžiovintos medžiagos, į džiovyklą tiekiamų ir iš džiovyklos gaunamų transporto priemonių temperatūra , °C; K – šilumos perdavimo per džiovyklos sienelę į aplinką koeficientas, W/(m^2·K), F – džiovinimo kameros bendras paviršiaus plotas, m^2; Δt – šildymo kameroje judančio agento ir aplinkos oro temperatūrų skirtumas, °C.

16. Džiovyklos šiluminis naudingumo koeficientas $\eta_{š}$ apskaičiuojamas pagal šią lygtį:

$$\eta_{š} = \frac{r}{q}; \tag{6.30}$$

čia r – vandens garų susidarymo šiluma, parenkama XVI priedų lentelėje pagal džiovinimo temperatūrą, J/kg; q – savitosios šilumos sąnaudos, J/kg.

17. Vandens garų parcialinis slėgis p_p, Pa, oro santykinį drėgnį matuojant psichrometru, gali būti apskaičiuotas pagal lygtį:

$$p_p = p_s^{\bullet} - A \cdot (t_s - t_d) \cdot B; \tag{6.31}$$

čia $p_s^{\bullet}$ – sočiųjų vandens garų slėgis, (parinktas iš XIV lentelės) pagal drėgno termometro parodymus, Pa; $t_s - t_d$ – sauso ir drėgno termometrų parodymų skirtumas, °C; B – barometrinis (atmosferinis) slėgis, Pa; A – koeficientas, priklausantis nuo drėgno oro srauto sklidimo greičio w.

Kai $w > 0{,}5$ m/s, A apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$A = 0{,}00001 \cdot (65 + \frac{6{,}75}{w}). \tag{6.32}$$

18. Drėgmės pašalinimo nuo drėgnos medžiagos paviršiaus greitis (pastovaus džiovinimo greičio periodo metu) w_g, kg/(m^2·h), gali būti apskaičiuotas pagal empirinę lygtį:

$$w_g = 0{,}04075 \cdot 133{,}3^{-1} \cdot w^{0{,}8} \cdot \Delta p; \tag{6.33}$$

čia w – oro greitis virš džiovinamos medžiagos, m/s; $\Delta p = p_s - p_p$ – sočiųjų vandens garų slėgio pasienio oro sluoksnyje prie drėgnos medžiagos paviršiaus ir parcialinio slėgio vandens garų, esančių oro sraute skirtumas, Pa.

19. Džiovinimo varos jėga Δx pastovaus džiovinimo greičio periode išreiškiama sotaus oro drėgnio $x_{soč}$ paviršiniame medžiagos sluoksnyje ir drėgnio, džiovinančio oro srauto centre x, skirtumu:

$$\Delta x = x_{soč} - x, \text{ kg}_{\text{d}}/\text{kg}_{\text{s.o}}. \tag{6.34}$$

Vidutinė varos jėga Δx_{vid}, $\text{kg}_{\text{d}}/\text{kg}_{\text{s.o}}$, apskaičiuojama pagal lygtį:

$$\Delta x_{vid} = \frac{\Delta x_1 - \Delta x_2}{2{,}3 \cdot lg(\Delta x_1 / \Delta x_2)}; \tag{6.35}$$

čia $\Delta x_1 = x_{soč} - x_1$; $\Delta x_2 = x_{soč} - x_2$; x_1, x_2, $x_{soč}$ – oro drėgnis, jam įtekant į džiovyklą, ištekant iš jos, ir drėgnis paviršiniame džiovinamos medžiagos sluoksnyje, $\text{kg}_{\text{dr}}/\text{kg}_{\text{s.o.}}$

6.2. Uždavinių sprendimo pavyzdžiai

6.1. Pvz. Į džiovyklą tiekiama 2 t/h drėgnos medžiagos, kurios viename kilograme absoliučiai sausos medžiagos yra 250 g. Po džiovinimo drėgmės kiekis sumažėja iki 50 g. Apskaičiuokite išdžiovintos, absoliučiai sausos medžiagos ir išgarintos drėgmės kiekius.

S p r e n d i m a s. Apskaičiuojamas medžiagos santykinis drėgnis iki ir po džiovinimo:

$$\omega_{s1} = \frac{0{,}25}{1+0{,}25} = 0{,}2 \text{ kg}_d/\text{kg}_{d.m} = 20\ \%;$$

$$\omega_{s2} = \frac{0{,}05}{1+0{,}05} = 0{,}048 \text{ kg}_d/\text{kg}_{d.m} = 4{,}8\ \%.$$

Pagal (6.4a) lygtį apskaičiuojamas išgarintas drėgmės kiekis:

$$W = \frac{2000}{3600} \cdot \frac{0{,}2-0{,}048}{1-0{,}048} = 0{,}089 \text{ kg/s}.$$

Išdžiovintos medžiagos kiekis G_2:

$G_2 = 2000/3600 - 0{,}089 = 0{,}467$ kg/s.

Pagal (6.1) lygtį apskaičiuojamas absoliutusis medžiagos drėgnis iki ir po džiovinimo

$$\omega_{a1} = \frac{1 \cdot 0{,}2}{1-0{,}2} = 0{,}25 \text{ kg}_d/\text{kg}_{d.m} = 25\ \%;$$

$$\omega_{a2} = \frac{1 \cdot 0{,}048}{1-0{,}048} = 0{,}05 \text{ kg}_d/\text{kg}_{d.m} = 5\ \%.$$

Absoliučiai sausos medžiagos kiekis G_{abs}:

$$G_{abs} = G_1 \cdot (1-\omega_{a1}) = (2000/3600) \cdot (1-0{,}25) = 0{,}42 \text{ kg/s}.$$

6.2. Pvz. Apskaičiuokite, koks drėgmės kiekis bus pašalinamas iš 1 kg drėgnos medžiagos, kai jos absoliutusis drėgnis sumažinamas: a) nuo 140 % iki 70 %, b) nuo 14 % iki 7 %.

S p r e n d i m a s. Pagal (6.1) lygtį apskaičiuojamas medžiagos santykinis drėgnis:

a) $\omega_{s1} = \frac{100 \cdot 140}{100+140} = 58{,}33\ \%$, $\omega_{s2} = \frac{100 \cdot 70}{100+70} = 41{,}18\ \%$,

b) $\omega_{s1} = \frac{100 \cdot 14}{100+14} = 12{,}28\ \%$, $\omega_{s2} = \frac{100 \cdot 7}{100+7} = 6{,}54\ \%$.

Pagal (6.4a) lygtį apskaičiuojamas pašalinamas drėgmės kiekis:

a) $W = 1 \cdot \dfrac{58{,}33 - 41{,}18}{100 - 41{,}18} = 0{,}292$ kg;

b) $W = 1 \cdot \dfrac{12{,}28 - 6{,}54}{100 - 6{,}54} = 0{,}0614$ kg.

6.3. Pvz. Apskaičiuokite drėgno oro absoliutųjį drėgnį ir entalpiją, kai oro temperatūra t = 30 °C, santykinis drėgnis φ = 30 %, barometrinis slėgis B = 0,0981 MPa.

S p r e n d i m a s. XVI priedų lentelėje, kai t = 30 °C, parenkamas sočiųjų vandens garų slėgis $p_{soč}$ = 0,0433 kgf/cm^2.

Apskaičiuojame:

pagal (6.6) lygtį absoliutųjį drėgnį:

$$x = 0{,}622 \cdot \frac{0{,}75 \cdot 0{,}0433}{1 - 0{,}75 \cdot 0{,}0433} = 0{,}0209 \text{ kg/kg}_{\text{s.o}};$$

pagal (6.8) lygtį entalpiją:

$$h = (1{,}011 + 1{,}97 \cdot 0{,}0209) \cdot 30 + 2493 \cdot 0{,}0209 = 83{,}6 \text{ kJ/kg}_{\text{s.o}}.$$

6.4. Pvz. Pagal 6.3. Pvz. duomenis apskaičiuokite drėgno oro savitąjį tūrį.

S p r e n d i m a s. Garų-oro mišinio savitasis tūris apskaičiuojamas pagal (6.14) lygtį:

$$v_{d.o.} = \frac{287 \cdot (273 + 30)}{(1 - 0{,}75 \cdot 0{,}0433) \cdot 9{,}81 \cdot 10^4} = 0{,}916 \text{ m}^3/\text{kg}_{\text{s.o}}.$$

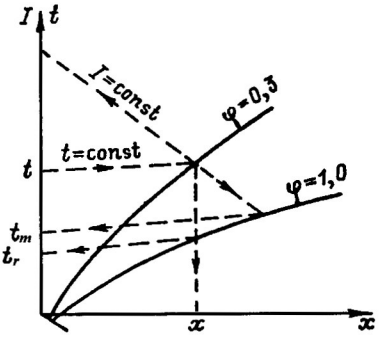
6.5. Pvz. Apskaičiuokite 150 °C temperatūros drėgno oro santykinį drėgnį, kai barometrinis slėgis B = 760 mm Hg ir absoliutusis drėgnis x = 0,070 kg/kg$_{\text{s.o.}}$.

S p r e n d i m a s. Esant bendram drėgno oro (barometriniam) slėgiui, artimam 1 kgf/cm^2, sočiųjų vandens garų temperatūra negali būti didesnė kaip 100 °C. Todėl sočių vandens garų slėgis $p_{soč}$ lygus barometriniam slėgiui B. Kai vandens garų-oro mišinio temperatūra didesnė kaip 100 °C, tuomet $x = 0{,}622 \cdot \varphi/(1 - \varphi)$, t. y. santykinis drėgnis nepriklauso nuo temperatūros, ir yra tik absoliučiojo drėgnio funkcija:

$$\varphi = x/(0{,}622 + x) = 0{,}070/(0{,}622 + 0{,}070) = 0{,}101 = 10{,}1 \text{ \%}.$$

6.6. Pvz. Nustatykite drėgno oro entalpiją h, rasos taško temperatūrą t_r ir drėgnį x, kai sausas termometras rodo 60 °C temperatūrą, barometras – 745 mm Hg slėgį. Oro santykinis drėgnis φ = 30 %. Gautas t_r ir t_d vertes palyginti su apskaičiuotomis pagal (6.6) ir (6.7) lygtis.

S p r e n d i m a s. Apytikslės h ir x vertės parenkamos Ramzino h–x diagramoje (6.1 pav.). Grafinis sprendimas atliekamas pagal tokią schemą (6.4 pav.). Nustatoma 60 °C temperatūros izotermos ir 30 % santykinio drėgnio φ linijos susikirtimo taškas. Per šį susikirtimo tašką nubrėžus pastovaus drėgnio x liniją ir izoentalpę, nustatoma: $h = 166$ kJ/kg$_{s.o.}$ ir $x = 0{,}04$ kg/kg$_{s.o}$, $t_r = 37$ °C ir $t_d = 40$ °C (6.4 pav.).



6.4 pav. Grafinė 6.6. Pvz. sprendimo schema

Rasos taško temperatūra surandama ir pagal iš (6.6) lygties apskaičiuotus duomenis.

Naudojant h–x diagramoje parinktą $x = 0{,}04$ kg/kg$_{s.o}$ vertę, gaunama priklausomybė $0{,}04 = 0{,}622 \cdot \dfrac{1 \cdot p_{soč}(t_r)}{133{,}3 \cdot 745 - 1 \cdot p_{soč}(t_r)}$. Pagal XIV lentelės duomenis nustatoma, kad $t_r = 36{,}1$ °C. Drėgno termometro rodmenys nustatomi taip pat iteracijos metodu, naudojant lygčių sistemą:

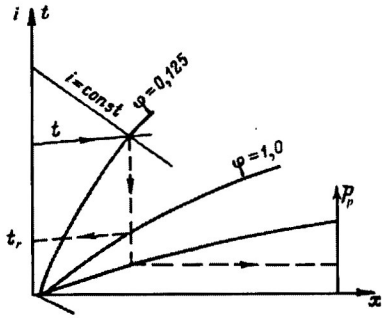
$$x_{soč} = 0{,}622 \cdot \frac{1 \cdot p_{soč}(t_d)}{133{,}3 \cdot 745 - 1 \cdot p_{soč}(t_d)};$$

$$(1{,}01 + 1{,}97 \cdot 0{,}04) \cdot 60 + 2493 \cdot 0{,}04 = (1{,}01 + 1{,}97 \cdot x_{soč}) \cdot t_d + 2493 \cdot x_{soč}.$$

Gaunama $t_d = 39{,}5$ °C. Norint tiksliau nustatyti x vertę, naudojama (6.6) lygtis:

$$x_{soč} = 0{,}622 \cdot \frac{0{,}3 \cdot 149{,}4 \cdot 133{,}3}{133{,}3 \cdot 745 - 0{,}3 \cdot 149{,}4 \cdot 133{,}3)} = 0{,}0398 \text{ kg/kg}.$$

6.7. Pvz. Drėgno oro temperatūra 80 °C, o entalpija $h = 150$ kJ/kg$_{s.o}$. Naudojant Ramzino h–x diagramą nustatyti parcialinį vandens garų slėgį p_p, santykinį drėgnį φ ir rasos taško temperatūrą t_r.



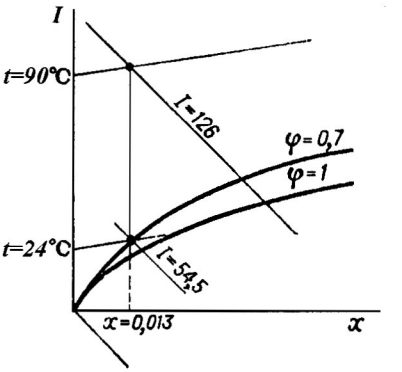
6.5 pav. Grafinė 6.7. Pvz. sprendimo schema

S p r e n d i m a s. Ramzino h–x diagramoje nustatomas izoentalpės 150 kJ/kg$_{s.o}$ ir izotermos 80 °C susikirtimo taškas, per kurį brėžiama linija, lygiagreti pastovaus oro drėgnio linijoms iki susikirtimo su parcialinio slėgio linija. Per susikirtimo tašką išvesta

horizontalė rodo, kad p_p = 28 mm Hg. Nustatoma (6.5 pav.): φ = 0,125, t_r = 29 °C.

6.8. Pvz. 24 °C temperatūros oras, kurio santykinis drėgnis φ = 0,7, pašildomas kaloriferyje iki 90 °C. Nustatykite iš kaloriferio ištekančio oro santykinį drėgnį φ_1 ir entalpiją h_1.

S p r e n d i m a s: *Grafiniu būdu* Ramzino *h–x* diagramoje pagal schemą (6.6 pav.) nustatomas izotermos 24 °C ir pastovaus santykinio oro drėgnio linijos φ = 0,7 susikirtimo taškas, kuris vaizduoja oro būseną iki šildymo. Per tą tašką nubrėžus tiesę, lygiagretę su pastovaus oro drėgnio linijomis, nustatoma $x_1 = x_0$ = 0,013 kg/kg$_{s.o}$ (oro drėgnis kaloriferyje nekinta). Per oro būklę prieš kaloriferį vaizduojantį tašką nubrėžus izoentalpę, nustatoma oro entalpija iki šildymo kaloriferyje: h_0 = 54,5 kJ/kg$_{s.o}$. Pratęsus liniją $x_1 = x_0$ iki susikirtimo su 90 °C izoterma, randamas po pašildymo kaloriferyje oro būseną vaizduojantis taškas. Per šį tašką nubrėžus izoentalpę, nustatome kaloriferyje pašildyto oro entalpiją h_1 = 126 kJ/kg$_{s.o}$ ir santykinį drėgnį φ_1 < 5 %.



6.6 pav. Grafinė 6.8. Pvz. sprendimo schema

Analitinis sprendimas. XIV lentelėje parenkamas sočiųjų vandens garų slėgis, esant t = 24 °C, $p_{s,0}$ = 2983 Pa ir t = 90 °C temperatūrai, $p_{s,1}$ = 70089 Pa. Priimama, kad barometrinis slėgis ore 760 mm Hg. Pagal (6.6) lygtį apskaičiuojamas oro drėgnis:

$$x_1 = x_0 = 0{,}622 \cdot \frac{0{,}7 \cdot 2983}{760 \cdot 133{,}3 - 0{,}7 \cdot 2983} = \frac{2088{,}1}{99219{,}9} \cdot 0{,}622 = 0{,}0131 \text{ kg/kg}_{s.o}.$$

Pagal (6.8) lygtį apskaičiuojamos h_0 ir h_1:

$$h_0 = (1{,}01 + 1{,}97 \cdot x) \cdot 24 + 2493 \cdot 0{,}01309 = 57{,}49 \text{kJ/kg}_{s.o.};$$

$$h_1 = (1{,}01 + 1{,}97 \cdot 0{,}01309) \cdot 90 + 2493 \cdot 0{,}01309 = 125{,}85 \text{ kJ/kg}_{s.o}.$$

Patikslinta φ_1 vertė iš *h–x* diagramos, kai p_p = 14 mm Hg

φ_1 = 14/760 = 0,0184 = 1,84 %.

6.9. Pvz. Apskaičiuokite vandens garų parcialinį slėgį p_p, oro tankį ir drėgnį, kai oro temperatūra 70 °C, slėgis P_{abs} = 380 mm Hg ir jo santykinis drėgnis φ = 0,4.

S p r e n d i m a s. Pagal t_s = 70 °C XIV lentelėje parenkame $p_{soč}$ = 31770 Pa.

Pagal (6.7) lygtį apskaičiuojame parcialinį garų slėgį $p_p = p_{miš} \cdot \varphi$, ($p_{miš} = p_{soč}$) p_p = 0,4·31770 = 12708 Pa.

Drėgno oro tankis pagal (6.12) lygtį:

$$\rho_{d.o.} = 1{,}293 \cdot \frac{273 \cdot P}{T \cdot 101300} \cdot (1 - 0{,}378 \cdot \frac{\varphi \cdot p_s}{P}) =$$

$$= 1{,}293 \cdot \frac{273 \cdot 380 \cdot 133{,}3}{333 \cdot 101300} \cdot (1 - \frac{0{,}378 \cdot 12708}{380 \cdot 133{,}3}) = 0{,}48 \text{ kg/m}^3.$$

Oro drėgnis apskaičiuojamas pagal (6.6) lygtį:

$$x = 0{,}622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_s}{P - \varphi \cdot p_s} = 0{,}622 \cdot \frac{12708}{380 \cdot 133{,}3 - 12708} = 0{,}208 \text{ kg/kg}_{\text{s.o}}.$$

6.10. Pvz. Apskaičiuokite sauso oro ir šilumos sąnaudas teorinėje džiovykloje, kai iš drėgnos medžiagos išgarinama 150 kg/h drėgmės. Oro parametrai: prieš džiovyklos kaloriferį $t_{s,0}$ = 15 °C, φ_0 = 80 %, ištekant iš džiovyklos t_2 = 44 °C, φ_2=50 %.

S p r e n d i m a s. *h–x* diagramoje nustatome: x_0 = 0,009 kg/kg$_{\text{s.o}}$, x_2 = 0,023 kg/kg$_{\text{s.o}}$ ir h_0 = 5,5 kJ/kg$_{\text{s.o}}$ bei h_2 = 17,6 kJ/kg$_{\text{s.o}}$.

Apskaičiuojamos:

pagal (6.16) lygtį savitosios sauso oro sąnaudos *l* teorinėje džiovykloje:

$$l = \frac{1}{x_2 - x_0} = \frac{1}{0{,}023 - 0{,}005} = 55{,}56 \text{ kg/kg}_{\text{dr išgar}};$$

pagal (6.20) lygtį savitosios šilumos sąnaudos *q* teorinėje džiovykloje:

$$q = \frac{h_1 - h_0}{x_2 - x_0} = \frac{17{,}6 - 5{,}5}{0{,}023 - 0{,}005} = 672{,}22 \text{ kJ/kg}_{\text{drs išgar}}.$$

Teorinėje džiovykloje sunaudotas oro kiekis *L* apskaičiuojamas pagal (6.15) lygtį:

$$L = W \cdot l = 55{,}56 \cdot 150 = 8333{,}33 \text{ kg/h}.$$

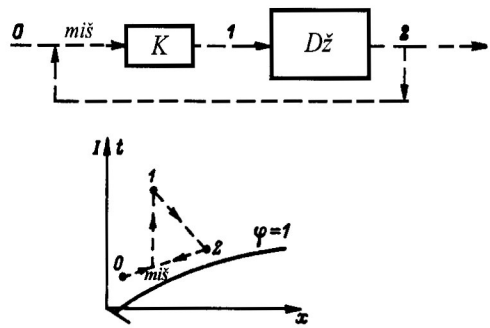
Teorinėje džiovykloje sunaudotas šilumos srautas Φ apskaičiuojamas pagal (6.17) lygtį:

$$\Phi_t = L \cdot (h_2 - h_0) = 83333{,}33 \cdot (17{,}6 - 5{,}5) = 100833{,}3 \text{ kJ/h} = 28{,}009 \text{ kW}.$$

6.11. Pvz. Apskaičiuokite išdžiovintos medžiagos temperatūrą, kai jos drėgnis didesnis už kritinį, ir medžiagą aptekančio oro temperatūra $t_2 = 100$ °C ir drėgnis $x_2 = 0{,}0135$ kg/kg$_{s.o}$.

S p r e n d i m a s. Kai medžiagos drėgnis didesnis už kritinį, ji džiovinama pastoviu greičiu. Per pastovaus džiovinimo greičio periodą medžiagos temperatūra lygi oro drėgno termometro rodmenims $t_{d,2}$. Ši temperatūra nustatoma Ramzino h–x diagramoje. Per izotermos t_2 =100 °C ir linijos $x_2 = 0{,}0135$ kg/kg$_{s.o}$ susikirtimo tašką nubrėžta izoentalpė, susikirsdama su linija $\varphi = 100$ % duoda tašką, kuris charakterizuoja ir drėgnos medžiagos temperatūrą $t_m = t_{2,d} = 38$ °C.

6.12. Pvz. Į džiovyklos kaloriferį tiekiamas šviežio oro ($t_{s,0} = 25$ °C, $\varphi_0 = 50$ %) ir iš džiovyklos ištekančio oro ($t_2 = 50$ °C, $\varphi_2 = 80$ %) mišinys (6.7 pav.). Masės debitų santykis mišinyje 1:3 (skaičiuojant pagal sausą orą). Apskaičiuokite mišinio parametrus iki kaloriferio ir jame pašildyto iki $t = 80$ °C.



6.7 pav. Grafinė 6.12. Pvz. sprendimo schema

S p r e n d i m a s. Ramzino h–x diagramoje nustatomas 25 °C izoter-mos ir $\varphi_0 = 50$ % linijos susikirtimo taškas *0*. Per tašką *0* nubrėžus izoentalpę ir pastovaus oro drėgnio liniją, nustatoma jo entalpija $h_0 = 50$ kJ/kg ir drėgnis $x_0 = 0{,}01$ kg/kg$_{s.o}$.

Tokiu pačiu būdu nustatomas iš džiovyklos ištekančio oro būseną vaizduojantis taškas *2* ir jo parametrai: $h_2 = 228$ kJ/kg, drėgnis $x_2 = 0{,}069$ kg/kg$_{s.o}$.

Mišinio drėgnis ir entalpija apskaičiuojami pagal adityvumo dėsnį (t. y. mišinio drėgnis arba entalpija lygūs šviežio ir panaudoto oro atnešto drėgnio, entalpijos dalių sumai):

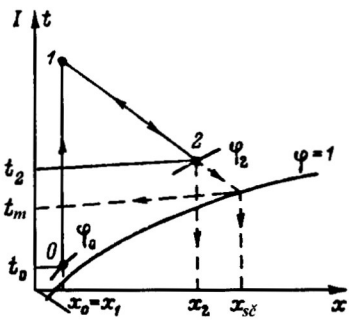
$$x_m = a_š \cdot x_š + a_a \cdot x_a = 0{,}25 \cdot 0{,}01 + 0{,}75 \cdot 0{,}069 = 0{,}0542 \text{ kg/kg}_{s.o};$$

$$h_m = a_š \cdot h_š + a_a \cdot h_a = 0{,}25 \cdot 50 + 0{,}75 \cdot 228 = 183{,}5 \text{ kJ/kg}_{s.o}.$$

Toliau Ramzino diagramoje nustatomas oro būseną iki kaloriferio vaizduojantis taškas ($x_m = 0{,}0542$ kg/kg$_{s.o}$ ir $h_m = 183{,}5$ kJ/kg$_{s.o}$.). Per šį tašką nubrėžus izoentalpę ir pastovaus santykinio drėgnio liniją, nustatoma $t_m = 45$ °C ir $\varphi_m = 0{,}85$. Šildant orą kaloriferyje, jo drėgnis nesikeičia, todėl nubrėžus per minėtą tašką einančią liniją $x_m = 0{,}0542$ kg/kg$_{s.o}$ iki susikirtimo su $t = 80$ °C izoterma, gaunamas iš kaloriferio ištekančio oro būseną vaizduojantis taškas *1*. Per *1* tašką nubrėžus izoentalpę ir pastovaus santykinio drėgnio liniją, nustatoma pašildyto oro mišinio entalpija $h_m = 221$ kJ/kg$_{s.o}$ ir santykinis drėgnis $\varphi_m = 0{,}018$.

6.13. Pvz. Apskaičiuokite teorinės džiovyklos džiovinimo procesą varančiąją jėgą Δx_{vid}, kai aplinkos oro $t_{s,0} = 22$ °C, $\varphi_0 = 0{,}75$, iš džiovyklos ištekančio oro $t_{s,2} = 50$ °C, $\varphi_2 = 0{,}45$.

S p r e n d i m a s. h–x diagramoje (6.8 pav.) pagal $t_{s,0} = 22$ °C, $\varphi_0 = 0{,}75$ ir $t_{s,2} = 50$ °C, $\varphi_2 = 0{,}45$ nustatomi taškai *0* ir *2*. Toliau per tašką *0* nubrėžiama linija $x_1 = x_0 = 0{,}0125$ kg/kg$_{s.o.}$ ir per tašką *2* – linija $h_1 = h_2$. Susikirtus tiesėms gaunamas taškas *1*, per kurį nubrėžę izotermą, gauname $t_1 = 111$ °C. Pagal tašką *2* nustatoma $x_2 = 0{,}037$ kg/kg$_{s.o.}$ Nustačius tiesės $h_1 = const$ susikirtimo su linija $\varphi = 1{,}0$ tašką, parenkama $t_{dr} = 37$ °C, $x_{soč} = 0{,}043$ kg/kg$_{s.o.}$ Naudojant (6.35) lygtį, apskaičiuojama Δx_{vid} vertė:



6.8 pav. Grafinė 6.13. Pvz. sprendimo schema

$$\Delta x_{vid} = \frac{(0{,}043 - 0{,}0125) - (0{,}043 - 0{,}037)}{ln\frac{(0{,}043 - 0{,}0125)}{(0{,}043 - 0{,}037)}} = 0{,}0152 \text{ kg/kg}_{s.o};$$

6.14. Pvz. Apskaičiuokite priešsrovėje, nuolatinio veikimo džiovykloje, dirbančioje pagal pagrindinę džiovinimo schemą, oro ir šildančių garų sąnaudas bei jų slėgį, kai duota:

į džiovyklą tiekiamos medžiagos kiekis	$G_1 = 350$ kg/h
medžiagos santykinis drėgnis iki džiovinimo	$\omega_{s1} = 42$ %
medžiagos santykinis drėgnis po džiovinimo	$\omega_{s2} = 11$ %
į džiovyklą tiekiamos medžiagos temperatūra	$t_{m.1} = 18$ °C
medžiagos temperatūra po džiovinimo	$t_{m.2} = 47$ °C
aplinkos oro parametrai (iki kaloriferio)	$t_0 = 15$ °C; $\varphi_0 = 70$ %
iš džiovyklos ištekančio oro parametrai	$t_2 = 45$ °C; $\varphi_2 = 60$ %
išdžiovintos medžiagos (ω_{s2}=10 %) savitoji šiluma	$c_2 = 2350$ J/(kg·K)
transporto priemonių (plieninio transporterio) masė	$G_{tr} = 600$ kg/h
šilumos nuostoliai į aplinką džiovykloje ir kaloriferyje	12 % nuo kitų narių sumos
šildančiųjų garų drėgnis	6 %
skirtumas tarp šildančiųjų garų ir iš kaloriferio ištekančio oro temperatūros	10 °C

S p r e n d i m a s. Pagal (6.4a) lygtį apskaičiuojamas džiovykloje išgarintos drėgmės kiekis W:

$$W = 350 \cdot \frac{42-11}{100-11} = 122 \text{ kg/h}=0{,}0339 \text{ kg/s}.$$

h–x diagramoje nustatomi oro drėgnis ir entalpija iki kaloriferio ($x_0 = 0{,}0077$ kg/kg$_{s.o}$ ir $h_0 = 35$ kJ/kg$_{s.o}$) ir ištekančio iš džiovyklos ($x_2 = 0{,}038$ kg/kg$_{s.o}$ ir $h_2 = 145$ kJ/kg$_{s.o}$).

Pagal (6.16) ir (6.15) lygtis apskaičiuojamos savitosios l ir bendros L oro sąnaudos džiovykloje:

$$l = 1/(0{,}038 - 0{,}0077) = 33{,}0 \text{ kg/kg}_{\text{dr išgar}};$$

$$L = W \cdot l = \frac{W}{x_2 - x_0} = \frac{122}{0{,}038 - 0{,}0077} = 4030 \text{ kg}_{s.o}/\text{h} = 1{,}12 \text{ kg}_{s.o}/\text{s}.$$

Pagal (6.19) ir (6.21) lygtis apskaičiuojamos bendrosios Φ_t ir savitosios q_t šilumos sąnaudos teorinėje džiovykloje ($h_1 = h_2$):

$$\Phi_t = \frac{L \cdot (h_2 - h_0)}{3600} = \frac{4030 \cdot (145000 - 35000)}{3600} = 123 \text{ kW};$$

$$q_t = \frac{145 - 35}{0{,}038 - 0{,}0077} = 3630 \text{ kJ/kg}_{\text{dr išgar}}.$$

Apskaičiuojamas šilumos srautas reikalingas pašildyti transporto priemones (transporto priemonių temperatūra lygi džiovinamos medžiagos temperatūrai):

$$\Phi_m = \frac{c_{tr} \cdot G_{tr} \cdot (t_{t,2} - t_{t,1})}{3600} = \frac{500 \cdot 600 \cdot (47 - 18)}{3600} = \frac{500 \cdot 30}{6} = 2{,}42 \text{ kW};$$

čia $c_{tr} = 500$ J/(kg·K) – plieno savitoji šiluma.

Pagal (6.25) lygtį apskaičiuojamas šilumos srautas išdžiovintos medžiagos pašildymui Φ_m:

$$\Phi_m = \frac{c_2 \cdot G_2 \cdot (\theta_2 - \theta_1)}{3600} = \frac{2350 \cdot (350 - 122) \cdot (47 - 18)}{3600} = \frac{2350 \cdot 9}{3{,}6} = 4{,}3 \text{ kW},$$

o pagal (6.26) lygtį, su drėgme į džiovyklą įnešamas šilumos srautas Φ_W:

$$\Phi_w = \frac{W \cdot c_d \cdot \theta_1}{3600} = \frac{4190 \cdot 122 \cdot 18}{3600} = 2{,}56 \text{ kW}.$$

Apskaičiuojamas į realios džiovyklos kaloriferį paduodamas šilumos srautas:

$$\Phi = L \cdot (h_1 - h_0) = (123 + 4{,}3 + 2{,}42 - 2{,}56) \cdot 1{,}12 = 143 \text{ kW}.$$

Kiek procentų šilumos srautas realioje džiovykloje didesnis negu teorinėje:

$$\Delta\Phi = \frac{\Phi - \Phi_t}{\Phi_t} \cdot 100 = \frac{143 - 123}{143} \cdot 100 = 14{,}0\ \%.$$

Apskaičiuojamas oro entalpijos pokytis kaloriferyje $h_1 - h_0$:

$h_2 = 145$ kJ/kg$_{s.o.}$; $h_1 = 163$ kJ/kg$_{s.o.}$; $h_1 - h_2 = 163 - 145 = 18$ kJ/kg$_{s.o.}$

h–x diagramoje nustatomas izoentalpės $h_1 = 163$ J/kg ir pastovaus drėgnio linijos $x_1 = x_0 = 0{,}0077$ kg/kg$_{s.o}$ susikirtimo taškas, kuris vaizduoja oro būseną, jam ištekant iš realios džiovyklos kaloriferio. Per šį tašką nubrėžus izotermą, nustatoma iš džiovyklos kaloriferio ištekančio oro temperatūra $t_1 = 138$ °C.

Šildančių garų temperatūra $t_g = 138 + 10 = 148$ °C.

Pagal šią temperatūrą iš XVI lentelės parenkamas šildančiųjų garų absoliutusis slėgis $p_{abs} = 0{,}461$ MPa ir garų susidarymo šiluma $r = 2122$ kJ/kg.

Apskaičiuojamos garų sąnaudos kaloriferyje: D_{bendr} ir d_{sav}:

$$D = \frac{\Phi}{r \cdot (1 - x)} = \frac{167288{,}9}{2122 \cdot (1 - 0{,}05)} = 0{,}08299 \text{ kg/s} = 298{,}7 \text{ kg/h};$$

$$d = \frac{D}{W} = \frac{298{,}745}{150} = 1{,}99 \text{ kg/kg}_{dr}.$$

6.15. Pvz. Nustatykite teorinės džiovyklos naudingumo koeficientą, kai džiovyklos darbo parametrai: $t_0 = 20$ °C, $\varphi_0 = 80$ %; $t_2 = 40$ °C ir $\varphi_2 = 60$ %.

S p r e n d i m a s. h–x diagramoje parenkami oro parametrai, jam įtekant į džiovyklos kaloriferį $x_0 = 0{,}013$ kg/kg$_{s.o}$, $h_0 = 52$ kJ/kg$_{s.o}$, ištekant iš džiovyklos $x_2 = 0{,}029$ kg/kg$_{s.o}$, $h_2 = 118$ kJ/kg$_{s.o}$ ir $t_{2,dr} = 34$ °C. Po to pagal (6.21) lygtį apskaičiuojamos savitosios šilumos sąnaudos q_t:

$$q_t = \frac{118 - 52}{0{,}029 - 0{,}013} = 4125 \text{ kJ/kg}_{\text{dr išgar}}.$$

Garavimo šiluma, kai $t_{2,dr} = 34$ °C, parenkama XVI lentelėje $r = 2417$ kJ/kg$_{s.o}$.

Teorinės džiovyklos naudingumo koeficientas η apskaičiuojamas pagal (6.30) lygtį:

$$\eta = 2417/4125 = 0{,}586 = 58{,}6\ \%.$$

6.16. Pvz. Apskaičiuokite oro, šilumos ir šildančių garų sąnaudas teorinėje džiovykloje, džiovyklos naudingumo koeficientą bei kaloriferio šilumos mainų

paviršiaus plotą. Džiovyklos našumas $G_1 = 500$ $kg_{d.m.}/h$. Joje medžiagos santykinis drėgnis sumažinamas nuo 60 % iki 10 %. Psichrometras rodo, kad aplinkos oro $t_s = 20$ °C, $t_{dr} = 15$ °C. Iš džiovyklos ištekančio oro $t_2 = 50$ °C ir $\varphi_2 = 50$ %. Sočiųjų šildymo vandens garų temperatūra 9 laipsniais didesnė negu iš kaloriferio ištekančio oro temperatūra, jų sausumo laipsnis 96 %. Šilumos perdavimo koeficientas kaloriferyje $K = 45$ W/(m^2·K). Šilumos nuostoliai sudaro 3 % nuo teorinės šilumos.

S p r e n d i m a s. Iš medžiagos pašalinamas drėgmės kiekis apskaičiuojamas pagal (6.4a) lygtį:

$$W = \frac{500}{3600} \cdot \frac{60-10}{100-10} = 0{,}0772 \text{ kg/s}.$$

h–x diagramoje (6.1 pav.) nustatomas aplinkos oro drėgnis, entalpija $x_0 = 0{,}009$ $kg/kg_{s.o}$ ir $h_0 = 44$ $kJ/kg_{s.o}$ ir atitinkamai oro ištekančio iš džiovyklos $x_2 = 0{,}042$ $kg/kg_{s.o}$, $h_2 = 162$ $kJ/kg_{s.o}$), taip pat iš kaloriferio ištekančio oro temperatūra $t_1 = 135$ °C.

Pagal (6.16) ir (6.15) lygtis apskaičiuojamos savitosios ir bendrosios sauso oro sąnaudos džiovykloje:

$$l = 1/(0{,}042 - 0{,}009) = 30{,}3 \text{ kg/kg}_{\text{dr išgar}};$$

$$L = 0{,}0772 \cdot 30{,}3 = 2{,}34 \text{ kg/s}.$$

Pagal (6.18) ir (6.21) lygtis apskaičiuojamos bendrosios ir savitosios šilumos sąnaudos džiovykloje:

$$\Phi_t = 0{,}0772 \cdot 3575 = 276 \text{ kW};$$

$$q_t = \frac{162-44}{0{,}042-0{,}009} = 3575 \text{ kJ/kg}_{\text{dr išgar}}.$$

Proceso naudingumo koeficientas (6.30 lygtis):

$$\eta = 2130/3575 = 0{,}596.$$

čia $r_{š.g} = 2130$ kJ/kg – šildymo garų kondensacijos šiluma parinkta XVI lentelėje pagal šildymo garų temperatūrą $t_{š.g} = t_1 + 9 = 135 + 9 = 144$ °C.

Šilumos srautas, įvertinus šilumos nuostolius:

$$\Phi = 1{,}03 \cdot \Phi_t = 1{,}03 \cdot 276 = 284 \text{ kW}.$$

Šildymo garų sąnaudos:

$$D = 284/(2130 \cdot 0{,}96) = 0{,}139 \text{ kg/s}.$$

Apskaičiuojamas vidutinis šildymo garų ir oro temperatūrų skirtumas:

$$\Delta t_{vid} = \frac{(144-20)-9}{ln[(144-20)/9]} = 43{,}8\ ^{\circ}\text{C}.$$

Pagal šilumos perdavimo lygtį apskaičiuojamas džiovyklos kaloriferio šilumos perdavimo paviršiaus plotas:

$$F = \frac{\Phi}{K \cdot \Delta t_{vid}} = \frac{284 \cdot 1000}{45 \cdot 43{,}8} = 144\ \text{m}^2.$$

6.3. Kontroliniai uždaviniai

6.1. Naudojant *h–x* diagramą užpildykite 6.2 lentelės visas eilutes.

6.2 lentelė. Oro parametrų nustatymas pagal *h–x* diagramą

Varianto Nr.	Termometro rodmenys, °C		Santykinis drėgnis φ, %	Absoliutusis drėgnis x, kg/kg	Entalpija h, kJ/kg	Parcialinis vandens garų slėgis p_p, mm Hg	Rasos taškas t_r, °C
	sauso t_s	drėgno t_d					
1	15	12					
2	22	17					
3	50		50				
4	20		70				
5	10			0,008			
6	20			0,012			
7	20				60		
8	30				80		
9	20					5	
10	50					10	

6.2. Naudojant įvairias medžiagų balanso lygtis užpildykite 6.3 lentelę.

6.3 lentelė. Džiovinamaos medžiagos parametrų skaičiavimas

Eil. Nr.	Našumas, kg/h				Santykinis drėgnis, %		Absoliutusis drėgnis, %	
	G_1	G_2	G_{abs}	W	$\omega_{s,1}$	$\omega_{s,2}$	$\omega_{a,1}$	$\omega_{a,2}$
1	1200				20	10		
2	1500						80	20
3		800					90	30
4		600			25	4		
5				500	22	2		
6				40			120	8
7			500		32	3		
8			300				150	6

6.3. Oro ir vandens garų mišinio temperatūra 130 °C, santykinis drėgnis $\varphi = 25\%$, bendras slėgis $B = 1{,}05$ kgf/cm^2. Apskaičiuokite oro parcialinį slėgį, jo tankį ir drėgnį. Kaip pasikeis minėti mišinio parametrai, jei mišinio santykinis drėgnis sumažėjus iki 10 %.

6.4. Nustatykite iš medžiagos pašalinamą drėgmės kiekį, savitąsias oro ir šilumos sąnaudas, kai per džiovyklą transportuojamo oro debitas $L = 200$ kg/h. Oro parametrai: jam įtekant į kaloriferį $t_0 = 30$ °C, $\varphi_0 = 50$ %, ištekant iš džiovyklos $t_2 = 40$ °C, $\varphi_2 = 70$ %.

6.5. Apskaičiuokite džiovinamoje ir išdžiovintoje medžiagoje esančius ir džiovinimo metu išgarintus drėgmės kiekius (6.4 lentelė).

6.4 lentelė. Drėgmės kiekių medžiagoje skaičiavimo rezultatai

Eil. Nr.	Medžiagos kiekis kg, kg/h		Santykinis drėgnis, %		Absoliutusis drėgnis, %		Medžiagoje esanti drėgmė kg/h, kg		Išgarinta drėgmės kg, kg/h
	G_1	G_2	$\omega_{s,1}$	$\omega_{s,2}$	$\omega_{a,1}$	$\omega_{a,2}$	W_1	W_2	
1	1200		15	3					
2	1000				80	8			
3		400	22	5					
4		500			90	9			

6.6. Pagal 6.5 lentelėje pateiktus duomenis nustatykite kaip pasikeis oro parametrai po jo pašildymo kaloriferyje.

6.5 lentelė. Oro parametrų kitimo kaloriferyje skaičiavimo rezultatai

Eil. Nr.	Oro parametrai									
	Prieš kaloriferį						Po kaloriferio			
	t_{so}, °C	t_{do}, °C	φ_0	h_o, kJ/kg$_{s.o}$	x_o, kg/kg$_{s.o.}$	p_p, mm Hg	t_1, °C	h_1, kJ/kg$_{s.o.}$	φ_1	Δh, kJ/kg$_{s.o.}$
1	20	17					105			
2	20		60				100			
3		15	80				90			
4	12				0,01		120			
5			50		0,01		130			
6	20					25,0	118			

6.7. Apskaičiuokite vandens garų kiekį, tenkantį 1 kg sausų dujų, garų mišinyje su: a) oru (palyginkite skaičiavimo rezultatus su gaunamais, naudojant h–x diagramą), b) su vandeniliu, c) su etanu. Mišinio temperatūra $t = 35$ °C, santykinis drėgnis $\varphi = 45$ % ir bendras (suminis) slėgis $B = 1{,}033$ kgf/cm^2.

6.8. Apskaičiuokite ventiliatoriaus našumą, jei juo džiovykloje iš drėgnos medžiagos pašalinama 200 kg/h drėgmės. Į džiovyklos kaloriferį įtekančio oro parametrai: $t_0 = 15$ °C, $\varphi_0 = 70$ %, iš džiovyklos ištekančio oro parametrai: $t_2 = 45$ °C, $\varphi_2 = 60$ %, bendras slėgis 730 mm Hg.

6.9. Apskaičiuokite oro ir šilumos sąnaudas džiovykloje, dirbančioje su 80 % atidirbusio oro recirkuliacija. Aplinkos oro santykinis drėgnis $\varphi_0 = 70$ %, entalpija $h_0 = 50$ kJ/kg$_{s.o}$, iš džiovyklos ištekančio oro santykinis drėgnis $\varphi_2 = 0{,}8$, entalpija $h_2 = 260$ kJ/kg$_{s.o}$. Džiovyklos našumas pagal į džiovyklą tie-

kiamą medžiagą G_1 = 2500 kg/h, santykinis medžiagos drėgnis prieš džiovinimą $\omega_{s,1}$ = 49 %, po džiovinimo $\omega_{s,2}$ = 5 %.

6.10. Apskaičiuoti reikalingas oro ir šilumos sąnaudas džiovykloje, kurios našumas 2 t/h absoliučiai sausos medžiagos. Medžiagos santykinis drėgnis iki džiovinimo $\omega_{s,1}$ = 54 %, po džiovinimo $\omega_{s,2}$ = 15 %. Atmosferos oro temperatūra $t_{s,0}$ = 20 °C, absoliutusis drėgnis x_0 = 0,01 $kg_{d.}/kg_{s.o}$, iš džiovyklos ištekančio oro $t_{s,2}$ = 35 °C, x_2 = 0,028 $kg_{d.}/kg_{s.o}$. Šilumos nuostoliai sudaro 15 % nuo teorinių šilumos sąnaudų.

6.11. Apskaičiuokite teorinės džiovyklos, dirbančios pagal pagrindinę džiovinimo schemą, šiluminį naudingumo koeficientą. Atmosferos oro $t_{s,0}$ = 20 °C ir φ_0 = 0,7, o po džiovyklos $t_{s,2}$ = 60 °C ir φ_2 = 0,4.

6.12. Apskaičiuokite vidutinę džiovinimo proceso varos jėgą teorinėje džiovykloje. Aplinkos oro parametrai $t_{s,0}$ = 20 °C ir φ_0 = 70 %, ištekant iš džiovyklos $t_{s,2}$ = 50 °C ir φ_2 = 70 %.

6.13. Medžiagos absoliutusis drėgnis iki džiovinimo $\omega_{a,1}$ = 37 %, kritinis – $\omega_{a,k}$ = 17 %, pusiausviras – $\omega_{a,p}$ = 2 %. Per 8 val. medžiaga išdžiovinama iki 9 % absoliučiojo drėgnio. Apskaičiuokite medžiagos džiovinimo trukmę, esant toms pačioms džiovinimo sąlygoms, kad medžiagos absoliutusis drėgnis sumažėtų iki 4 %.

6.14. Apskaičiuokite valcinės džiovyklos šilumos perdavimo paviršiaus plotą. Džiovyklos našumas 300 kg/h išdžiovintos medžiagos. Santykinis medžiagos drėgnis iki džiovinimo 45 %, po džiovinimo 4 %. Šilumos perdavimo koeficientas nuo sienelės medžiagai K = 350 W/(m^2·K). Medžiagos temperatūra džiovykloje padidėja nuo 20 °C iki 60 °C. Šildymo garų absoliutusis slėgis būgno apvalkale 0,15 MPa. Medžiagos savitoji šiluma c_m = 1,26 kJ/(kg·K). Šilumos nuostoliai sudaro 10 % nuo garų kondensacijos metu būgno apvalkale išsiskyrusios šilumos.

6.15. Džiovyklos našumas 1800 kg/h drėgnos medžiagos. Medžiagos santykinis drėgnis iki džiovinimo 55 %, po džiovinimo 10 %. Aplinkos oras, kurio $t_{s,0}$ = 20 °C ir φ_0 = 70 %, pašildomas džiovyklos kaloriferyje iki 110 °C, o ištekėdamas iš džiovyklos turi džiovinimo varos jėgą χ_2 = 10 °C. Apskaičiuokite oro ir šildymo garų sąnaudas. Šildymo garų absoliutusis slėgis 2,5 kgf/cm^2 ir drėgnis 5 %.

6.16. Apskaičiuokite šildymo garų sąnaudas džiovykloje bei džiovyklos kaloriferio šilumos mainų paviršiaus plotą. Šildymo garų sausumo laipsnis 95 %, absoliutusis slėgis p_{abs} = 0,2 MPa. Kaloriferio šilumos perdavimo koeficientas K = 32 W/(m^2·K). Džiovyklos našumas 600 kg/h absoliučiai sausos medžiagos. Džiovykloje medžiagos absoliutusis drėgnis sumažinamas nuo 45 % iki 10 %. Įtekančio į kaloriferį oro temperatūra $t_{s,0}$ = 20 °C, rasos taškas $t_{r,0}$ = 8 °C. Iš ka-

loriferio ištekančio oro entalpija h_1 = 125 kJ/kg$_{s.o.}$ Iš džiovyklos ištekančio oro temperatūra $t_{s,2}$ = 50 °C. Šilumos nuostoliai sudaro 15 % nuo šilumos sąnaudų teorinėje džiovykloje.

6.17. Priešsrovinės džiovyklos našumas G_1 = 1300 kg/h džiovinimui tiekiamos medžiagos. Džiovinamos medžiagos santykinis drėgnis iki džiovinimo $\omega_{s,1}$ = 50 %, po džiovinimo $\omega_{s,2}$ = 10 %. Į kaloriferį tiekiamo oro $t_{s,0}$ = 10 °C ir φ_0 = 0,8. Iš džiovyklos ištekančio oro $t_{s,2}$ = 50 °C ir φ_2 = 0,4. Kaloriferyje naudojami sotieji vandens garai. Garų sausumo laipsnis – 0,95. Apskaičiuokite oro ir šildymo garų sąnaudas. Skaičiuokite dviems variantams: a) teorinei džiovyklai, b) realiai džiovyklai. Į realią džiovyklą tiekiamos medžiagos temperatūra $t_{m,1}$ = 15 °C ir savitoji šiluma c_1 = 1,68 kJ/(kg·K). Medžiagos temperatūra po džiovinimo $t_{m,2}$ = 55 °C. Per valandą išdžiovinamos medžiagos kiekį pernešančio transporterio masė 450 kg. Šilumos nuostoliai į aplinką džiovykloje sudaro 10 % nuo teorinio šilumos kiekio.

6.18. Į teorinę su dviejų laipsnių tarpiniu oro pašildymu džiovyklą tiekiama 2400 kg/h drėgnos medžiagos. Medžiagos santykinis drėgnis iki džiovinimo 45 %, po džiovinimo 8 %. Į kaloriferį įtekančio oro parametrai: $t_{s,0}$ = 20 °C, x_0 = 0,01 kg/kg$_{s.o.}$ Iš džiovyklos ištekančio oro temperatūra $t_{s,2}$ = 45 °C. Kiekviename iš trijų kaloriferių oras pašildomas iki 70 °C, iš kiekvienos šildymo kameros ištekančio oro santykinis drėgnis $\varphi_{i,2}$ = 70 %. Kaloriferiai šildomi sočiaisiais vandens garais, kurių absoliutusis slėgis p_{abs} = 0,3 MPa, drėgnis x = 5 %. Apskaičiuokite reikalingas džiovinančio oro ir šildymo garų sąnaudas.

6.19. Apskaičiuokite džiovyklos našumą pagal drėgnos medžiagos kiekį G_1 ir kaloriferio šilumos perdavimo koeficientą K, kai džiovykloje medžiagos santykinis drėgnis sumažinamas nuo 60 % iki 10 %. Kaloriferio šilumos mainų paviršiaus plotas F = 41 m^2, šildymo garų sąnaudos 180 kg/h, jų perteklinis slėgis 200 kPa, drėgnis x = 10 %. Šilumos sąnaudos kaloriferyje 10 % didesnės už sąnaudas teorinėje džiovykloje. Atmosferos oro temperatūra $t_{s,0}$ = 20 °C, rasos taško temperatūra $t_{r,0}$ = 10 °C. Džiovinimo procesas vyksta, esant $h_1 = h_2$ = 100 kJ/kg$_{s.o.}$, parcialinis vandens garų slėgis iš džiovyklos ištekančiame ore 25 mm Hg.

6.20. Džiovyklos našumas pagal išdžiovintą medžiagą G_2 = 500 kg/h išdžiovintos medžiagos. Medžiagos santykinis drėgnis sumažinamas nuo $\omega_{s,1}$ = 70 % iki $\omega_{s,2}$ = 10 %. Psichrometro rodmenys atmosferos ore $t_{s,0}$ = 20 °C ir $t_{dr,0}$ = 15 °C. Iš džiovyklos ištekančio oro temperatūra t_2 = 45 °C, santykinis drėgnis φ_2 = 60 %. Šilumos nuostoliai sudaro 10 % nuo šilumos sąnaudų teorinėje džiovykloje. Šilumos perdavimo koeficientas K = 35 W/(m^2·K). Šildymo sočiųjų vandens garų absoliutus slėgis p_{abs} = 320 kPa, drėgnis x = 5 %. Apskaičiuokite džiovyklos kaloriferio šilumos mainų paviršiaus plotą ir šildymo garų sąnaudas kaloriferyje.

6.21. Džiovykloje džiovinama 1000 kg/h drėgnos medžiagos. Medžiagos santykinis drėgnis sumažinamas nuo 50 % iki 10 %. Džiovinama atmosferinėje orinėje džiovykloje pastovaus džiovinimo greičio periode, esant 40 °C medžiagos temperatūrai. Atmosferos oro temperatūra $t_{s,0}$ = 20 °C ir santykinis drėgnis φ_0 = 60 %, iš džiovyklos ištekančio oro temperatūra t_2 = 45 °C, santykinis drėgnis φ_2 = 50 %. Į džiovyklą tiekiamos medžiagos temperatūra $t_{m,1}$ = 15 °C ir savitoji šiluma c_1 = 1,68 kJ/(kg·K). Šilumos nuostoliai į aplinką ir šilumos sąnaudos tarai bei transporto priemonėms pašildyti nevertinami.

6.22. Teorinėje džiovykloje, kurios našumas 600 kg/h absoliučiai sausos medžiagos, medžiagos santykinis drėgnis nuo 35 % sumažinamas iki 8 %. Aplinkos oro psichrometro parodymai $t_{s,0}$ = 17 °C ir $t_{dr,0}$ = 14 °C, iš džiovyklos ištekančio oro temperatūra t_2 = 50 °C ir santykinis drėgnis φ_2 = 70 %. Džiovinantis oras šildomas džiovyklos kaloriferyje sočiaisiais vandens garais, kurių absoliutusis slėgis p_{abs} = 200 kPa, drėgnis x = 5 %. Apskaičiuokite šildymo garų sąnaudas ir šilumos perdavimo paviršiaus plotą, jei kaloriferyje šilumos perdavimo koeficientas K = 33 W/(m^2·K).

6.23. Džiovykloje džiovinama G_1 = 0,8 t/h drėgnos medžiagos. Jos santykinis drėgnis iki džiovinimo 55 %, po džiovinimo 10 %. Aplinkos oro psichrometro parodymai $t_{s,0}$ = 10 °C ir $t_{dr,0}$ = 5 °C, iš džiovyklos ištekančio oro temperatūra t_2 = 50 °C ir santykinis drėgnis φ_2 = 0,5. Oras šildomas kaloriferyje sočiaisiais vandens garais, kurių sausumo laipsnis 0,95 ir temperatūra 15 °C aukštesnė už ištekančio iš kaloriferio oro temperatūrą. Šilumos sąnaudos kaloriferyje 10 % didesnės negu teorinėje džiovykloje. Šilumos perdavimo koeficientas kaloriferyje K = 35 W/(m^2·K). Apskaičiuokite oro ir garų sąnaudas, šildymo garų perteklinį slėgį ir reikalingą kaloriferio šilumos mainų paviršiaus plotą.

6.24. Teorinėje džiovykloje su atidirbusio oro recirkuliacija džiovinamos medžiagos santykinis drėgnis sumažinamas nuo 48 % iki 6 %. Atmosferos oro entalpija h_0 = 50 kJ/kg$_{s.o}$, parcialinis slėgis p_p = 12 mm Hg. Džiovykloje sunaudojama 1,67 kg/s oro. Džiovinančio agento (mišinio) parametrai, jam įtekant į kaloriferį: x_m = 0,034 kg$_{dr.}$/kg$_{s.o}$ ir t_m = 40 °C. Mišinys kaloriferyje šildomas sočiaisiais vandens garais iki 88 °C, esant šilumos perdavimo koeficientui K = 47 W/(m^2·K). Šildymo garų perteklinis slėgis p_m = 0,2 MPa. Apskaičiuokite džiovyklos našumą pagal išdžiovintą medžiagą, kaloriferio šilumos mainų paviršiaus plotą ir recirkuliuojamą oro dalį.

PRIEDAI

LENTELĖS

I lentelė. Kietųjų medžiagų tankis

Medžiaga	Tankis, kg/m^3	Piltinis tankis, kg/m^3
Alebastras	2500	-
Anglis (akmens)	1350	800
Anglis (medžio)	1450	200
Antracitas	1600	-
Asbestas	2600	-
Betonas	2300	-
Cementas	2900	-
Druska	2350	1020
Emalis	2350	-
Faolitas	1730	-
Fosforitas	-	1600
Gipsas	2240	1300
Granitas	2700	-
Guma	1500	-
Kamštis	240	-
Kaolinas	2200	-
Kaučiukas	930	-
Keramika	2600	-
Klintis	2650	1800
Koksas	1300	500
Kreida (gabalinė)	2200	1300
Kvarcas	2650	1500
Marmuras	2600	-
Molis (sausas)	-	1380
Oda (sausa)	860	-
Parafinas	900	-
Paranitas	1200	-
Pelenai	2200	680
Piritas	5000	3300
Plyta	1500	-
Potašas	2260	-
Pušis	500	-
Smėlis (sausas)	1500	1200
Stiklas	2500	-
Soda (kristalinė)	1450	800
Tekstolitas	1380	-
Uoliena (lydyta)	3000	-
Viniplastas	1380	-
Žemė (sausa)	1800	1300
Metalai		
Ketus (pilkasis)	7250	-
Plienas	7850	-
Varis (valcuotas)	8800	-
Žalvaris	8500	-
Aliuminis	2700	-
Švinas	11400	-
Ugniai atsparios medžiagos		
Dinasas	1900	-
Magnezitas	2900	-
Šamotas	1900	-
Maisto produktai		
Cukraus pudra	1538	660
Cukrus (birus)	1538	900
Kaulai	1140	-
Kiauliena	1045	-
Krakmolas	1648	650
Maistiniai ledai	1100	-
Margarinas	970	-
Miltai	-	762
Pieno milteliai:		
riebaus	-	600
nugriebto	-	570
išrūgų	-	500
Sūris (riebus)	1080	-
Varškė (riebi)	1060	-
Šokoladas	1235	-
Taukai	850	-

II lentelė. Skysčių tankis, esant (0–20) °C temperatūrai

Skystis	Tankis, kg/m^3	Skystis	Tankis, kg/m^3
Acto rūgštis, 70 %	1070	Glicerinas, 100 %	1270
Acto rūgštis, 30 %	1040	Glicerinas, 80 %	1130
Alaus misa	1046–1068	Grietinėlė	994
Aliejus	926	Ksilenas	880
Alus	1027–1048	Mazutas	890–950
Amoniakas, 26 %	910	Medus	1435
Anglies tetrachloridas	1630	Metanolis, 90 %	820
Azoto rūgštis, 92 %	1500	Metanolis, 30 %	950
Benzinas	760	Nafta	790–950
Chloroformas	1530	Naftalinas (išlydytas)	1100
Dietilo eteris	710	Nitrobenzenas	1200
Druskos rūgštis (rūkstanti)	1210	Pienas (nenugriebtas)	1029
Etanolis, 100 %	790	Sieros rūgštis, 30 %	1220
Etanolis, 70 %	850	Cukraus sotusis tirpalas	1333
Etanolis, 40 %	920	Sultys (obuolių)	1030–1312
Etanolis, 10 %	980	Sultys (vyno gamybai)	1030–1109
Etilacetatas	900	Vynas	993–1012
Etilenchloridas	1280	Žibalas	850
Gyvsidabris	13600		

III lentelė. Skystų medžiagų ir vandeninių tirpalų tankis (kg/m^3), esant skirtingoms temperatūroms

Medžiaga	Temperatūra, °C							
	-20	0	20	40	60	80	100	120
Acetonas	835	813	791	768	746	719	693	665
Acto rūgštis, 100 %	-	1072	1048	1027	1004	981	958	922
Acto rūgštis, 50 %	-	1074	1058	1042	1026	1010	994	978
Aliejus (saulėgrąžų)	954	940	926	912	898	884	871	857
Alus	-		1029	1022	1013	-	-	-
Amoniakas (skystas)	665	639	610	580	545	510	462	390
Amoniakinis vanduo, 25 %	-	918	907	897	887	876	866	856
Anglies sulfidas	1323	1293	1263	1233	1200	1165	1125	1082
Anglies tetrachloridas	1670	1633	1594	1556	1517	1471	1434	1390
Anilinas	-	1039	1022	1004	987	969	952	933
Azoto rūgštis, 100 %	1582	1547	1513	1478	1443	1408	1373	1338
Azoto rūgštis, 50 %	-	1334	1310	1287	1263	1238	1212	1186
Benzenas	-	900	879	858	836	815	793	769
Butanolis	838	824	810	795	781	766	751	735

III lentelės tęsinys

Medžiaga	Temperatūra, °C							
	-20	0	20	40	60	80	100	120
Chlorbenzenas	1150	1128	1107	1085	1065	1041	1021	995
Chloroformas	1563	1526	1489	1450	1411	1380	1326	1280
Dichloretanas	1310	1282	1254	1224	1194	1163	1133	1102
Dietilo eteris	758	736	714	689	666	640	611	576
Druskos rūgštis, 30 %	1173	1161	1149	1138	1126	1115	1103	1090
Etanolis, 100 %	823	806	789	772	754	735	716	693
Etanolis, 80 %	-	857	843	828	813	797	783	768
Etanolis, 60 %	-	904	891	878	864	849	835	820
Etanolis, 40 %	-	947	935	923	910	897	885	872
Etanolis, 20 %	-	977	969	957	946	934	922	910
Etilacetatas	947	924	901	876	851	825	797	768
Fenolis (išlydytas)	-	-	1075	1058	1040	1022	1003	987
Glicerinas, 50 %	-	1136	1126	1116	1106	1006	996	986
Grietinėlė, 30 %	-	-	994	983	974	962	960	-
Heksanas	693	677	660	641	622	602	581	559
Izopropanolis	817	801	785	768	752	735	718	700
Kalcio chloridas, 25 %	1248	1239	1230	1220	1210	1200	1190	1180
Metanolis, 100 %	828	810	792	774	756	736	714	-
Metanolis, 40 %	-	946	935	924	913	902	891	880
m-Ksilenas	-	882	865	847	831	796	796	777
Natrio chloridas, 20 %	-	1157	1148	1189	1130	1120	1110	1100
Natrio šarmas, 50 %	-	1540	1525	1511	1497	1483	1469	1454
Natrio šarmas, 40 %	-	1443	1430	1416	1403	1389	1375	1360
Natrio šarmas, 30 %	-	1340	1328	1316	1303	1289	1276	1261
Natrio šarmas, 20 %	-	1230	1219	1208	1196	1183	1170	1155
Natrio šarmas, 10 %	-	1117	1109	1100	1089	1077	1064	1049
Nitrobenzenas	-	1223	1203	1183	1163	1143	1123	1103
Oktanas	734	718	702	686	669	653	635	617
Oleumas, 20 %	-	1922	1896	1870	1844	1818	1792	1766
Pienas (natūralus)	-	1033	1029	1021	1011	1000	-	-
Propanolis	-	819	804	788	770	752	733	711
Sieros dioksidas (skystas)	1484	1434	1383	1327	1264	1193	1111	1010
Sieros rūgštis, 98 %	-	1857	1837	1817	1798	1779	1761	1742
Sieros rūgštis, 92 %	1866	1845	1824	1803	1783	1765	1744	1723
Sieros rūgštis, 75 %	1709	1689	1669	1650	1632	1614	1597	1580
Sieros rūgštis, 60 %	1532	1515	1498	1482	1466	1450	1434	1418
Skruzdžių rūgštis	-	1244	1220	1195	1171	1147	1121	1096
Toluenas	902	884	866	847	828	808	788	766
Vanduo	-	1000	998	992	983	972	958	943
Vynas (muskatinis)	-	1092	1086	1077	1065	-	-	-

IV lentelė. Vandeninių tirpalų dinaminė klampa, mPa·s

Ištirpinta medžiaga	Masės dalis, %	Temperatūra, °C				
		0	20	30	40	60
NaOH	5	-	1,30	1,05	0,85	-
	15	-	2,78	2,10	1,65	-
	25	-	7,42	5,25	3,86	-
NaCl	5	1,86	1,07	0,87	0,71	0,51
	15	2,27	1,36	1,07	0,89	0,64
	25	3,31	1,89	-	-	-
$NaNO_3$	10	-	1,07	0,88	0,72	0,54
	20	-	1,18	1,03	0,86	0,62
	30	-	1,33	1,30	1,07	0,79
Na_2CO_3	10	-	1,74	1,38	1,10	-
	20	-	4,02	2,91	2,25	-
	30	-	-	8,35	5,60	-
KOH	10	-	1,23	1,00	0,83	-
	20	-	1,63	1,33	1,11	-
	30	-	2,36	1,93	1,57	-
KCl	5	1,70	0,99	0,80	0,66	0,48
	15	1,58	1,00	0,83	0,69	0,52
	20	-	1,02	0,85	0,72	0,54
KNO_3	5	1,68	0,98	0,80	0,66	0,49
	15	-	0,98	0,80	0,69	0,51
	30	-	-	0,89	-	-
NH_4NO_3	10	1,58	0,96	0,79	0,66	0,50
	30	1,51	1,00	0,84	0,73	0,57
	50	-	1,33	1,14	0,99	0,77
$MgCl_2$	10	2,80	1,50	-	-	-
	20	5,30	2,70	-	-	-
	35	19,3	10,1	-	-	-
$CaCl_2$	10	2,17	1,27	-	-	-
	20	3,14	1,89	-	-	-
	35	8,90	5,10	-	-	-
Cukrus	60	-	57,2	33,1	20,6	9,5
	70	-	460,0	214,1	111,1	38,8
	80	-	-	-	2160,0	393,9

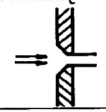
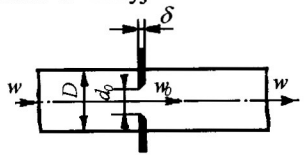
VI lentelė. Skystų medžiagų ir vandeninių tirpalų dinaminės klampos, mPa·s, skirtingose temperatūrose

Medžiaga	Temperatūra, °C											
	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120
Acto rūgštis, 100 %	-	-	-	-	1,22	1,04	0,9	0,79	0,7	0,56	0,46	0,37
Acto rūgštis, 50 %	-	-	4,35	3,03	2,21	1,7	1,35	1,11	0,92	0,65	0,5	0,4
Amoniakinis vanduo, 25 %	-	-	-	1,72	1,3	1,05	0,855	0,71	0,6	0,42	0,32	0,23
Azoto rūgštis, 100 %	1,49	1,24	1,05	0,92	0,8	0,72	0,64	0,57	0,5	0,39	0,35	0,31
Azoto rūgštis, 50 %	-	4	3,05	2,4	1,88	1,55	1,28	1,07	0,9	0,68	0,53	0,44
Dichloretanas	1,54	1,24	1,08	0,95	0,84	0,74	0,65	0,565	0,51	0,42	0,36	0,31
Druskos rūgštis, 30 %	-	-	-	2,1	1,7	1,48	1,3	-	-	-	-	-
Etanolis, 80 %	-	-	3,69	2,71	2,01	1,53	1,2	0,97	0,79	0,57	0,52	0,43
Etanolis, 60 %	-	-	5,75	3,77	2,67	1,93	1,45	1,13	0,9	0,6	0,45	0,34
Etanolis, 40 %	-	-	7,14	4,39	2,91	2,02	1,48	1,13	0,89	0,6	0,44	0,34
Etanolis, 20 %	-	-	5,32	3,17	2,18	1,55	1,16	0,91	0,74	0,51	0,38	0,30
Grietinėlė, 30 %	-	-	-	-	6,70	4,87	3,42	2,88	2,33	1,80	-	-
Izopropanolis	10,1	6,8	4,6	3,26	2,39	1,76	1,33	1,03	0,8	0,52	0,38	0,29
Kalcio chloridas, 25 %	10,6	7	4,47	3,36	2,74	2,25	1,85	1,55	-	-	-	-
Medus, 24 % drėgnio	-	-	-	-	1300	500	400	200	100	30	-	-
Metanolis, 40 %	-	-	3,65	2,54	1,84	1,37	-	-	-	-	-	-
Natrio chloridas, 20 %	-	4,08	2,67	1,99	1,56	1,24	1,03	0,87	0,74	0,57	0,46	0,38
Natrio šarmas, 50 %	-	-	-	-	-	46	25	16	8,03	5,54	3,97	3,42
Natrio šarmas, 30 %	-	-	-	-	13	9	6,3	4,6	3,4	2,16	1,82	1,71
Natrio šarmas, 10 %	-	-	-	-	1,86	1,45	1,16	0,98	0,91	0,7	0,65	0,6
Oktanas	0,968	0,829	0,703	0,61	0,54	0,479	0,428	0,386	0,35	0,291	0,245	0,208
Oleumas, 20 %	-	-	95	60	36,6	28,8	20,8	12,8	9	5,3	-	-
Pienas (natūralus)	-	-	-	2,47	1,79	1,33	1,04	0,85	0,71	0,57	-	-
Sieros dioksidas (skystas)	0,455	0,41	0,368	0,334	0,304	0,279	-	-	-	-	-	-
Sieros rūgštis, 92 %	130	90	48	32	23,1	15,6	11,8	8,4	6,7	3,8	2,5	1,95
Sieros rūgštis, 75 %	95	5	30	20	13,9	10,6	8,1	5,9	4,6	2,8	1,9	1,45
Skruzdžių rūgštis	-	-	-	2,25	1,78	1,46	1,22	1,03	0,89	0,68	0,54	0,4
Vynas (muskatinis)	-	12,4	7,36	4,71	3,13	2,28	1,76	1,44	1,34	-	-	-

V lentelė. Pagrindinės dujų fizikinės savybės

Pavadinimas	Formulė	Tankis, kg/m³, esant $t = 0$ °C ir $p = 0{,}1$ MPa slėgiui	Molekulinė masė, kg/kmol	Savitoji šiluma, esant 20 °C ir $p_{abs} = 0{,}1$ MPa, kJ/(kg·K)		$k = c_p/c_v$	Virimo temperatūra, °C, esant $p = 0{,}1$ MPa slėgiui	Garų susidarymo šiluma r, kJ/kg, esant $p = 0{,}1$ MPa slėgiui	Kritiniai taškai		Dinaminė klampa μ_0, 10^6 Pa·s, esant $t = 0$ °C ir $p_{abs} = 0{,}1$ MPa	Lygties 1.8 konstanta C
				c_p	c_v				Temperatūra, °C	Absoliutusis slėgis, MPa		
Acetilenas	C_2H_2	1,17	26,0	1,68	1,36	1,24	-83,7	830	+35,7	6,043	9,35	198
Amoniakas	NH_3	0,77	17	2,22	1,68	1,29	-33,4	1374	+132,4	10,938	9,18	626
Anglies dioksidas	CO_2	1,98	44,0	0,838	0,654	1,30	-78,2	574	+31,1	7,151	13,7	254
Anglies monoksidas	CO	1,25	28,0	1,05	0,754	1,40	-191,5	212	-140,2	3,387	16,6	100
Argonas	Ar	1,78	39,9	0,53	0,323	1,66	-185,9	163	-122,4	4,709	20,9	142
Azotas	N_2	1,25	28	1,05	0,746	1,40	-195,8	199	-147,1	3,285	17	114
Azoto dioksidas	NO_2	-	46,0	0,804	0,62	1,31	+21,2	712	+158,2	9,810	-	-
Benzenas	C_6H_6	-	78,1	1,25	1,14	1,1	+80,2	394	+288,5	4,679	7,2	-
Butanas	C_4H_{10}	2,673	58,1	1,92	1,80	1,08	-0,5	387	+152	3,679	8,1	377
Chloras	Cl_2	3,22	70,9	0,482	0,355	1,36	-33,8	306	+144,0	7,465	12,9(16 °C)	351
Deguonis	O_2	1,429	32,0	0,913	0,654	1,40	-183,0	213	-118,8	4,877	20,3	131
Etanas	C_2H_6	1,36	30,1	1,73	1,45	120	-88,5	486	+32,1	4,792	8,5	287
Etilenas	C_2H_4	1,26	28,1	1,53	1,26	1,20	-103,7	482	+9,7	4,974	9,85	241
Helis	He	0,179	4,0	5,28	3,18	1,66	-268,9	19,5	-268,0	0,222	18,8	78
Metanas	CH_4	0,72	16,0	2,23	1,70	1,31	-161,6	511	-82,15	4,473	10,3	162
Metilo chloridas	CH_3Cl	2,3	50,5	0,742	0,582	1,28	-21,4	406	+148	6,475	9,89	454
Oras	-	1,293	29,0	1,01	0,721	1,40	-195	197	-140,7	3,649	17,3	124
Pentanas	C_5H_{12}	-	72,2	1,72	1,58	1,09	+36,1	360	+197,1	3,237	8,74	-
Propanas	C_3H_8	2,02	44,1	1,87	1,65	1,13	-42,1	427	+95,6	4,218	7,95(18 °C)	278
Propilenas	C_3H_6	1,91	42,1	1,63	1,44	1,17	-47,7	440	+91,4	4,454	8,35(20 °C)	322
Sieros dioksidas	SO_2	2,93	64,1	0,633	0,503	1,25	-10,8	394	+157,5	7,630	11,7	396
Sieros vandenilis	H_2S	1,54	34,1	1,060	0,804	1,30	-60,2	549	+100,4	18,531	11,66	-
Vandenilis	H_2	0,090	2,02	14,3	10,14	1,407	-252,8	455	-239,9	1,256	8,42	73

VII lentelė. Vietinių kliūčių koeficientai ξ

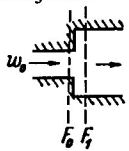
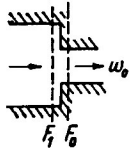
<table>
<tr><th>Kliūties tipas</th><th colspan="12">Vietinės kliūties koeficiento vertė</th></tr>
<tr><td>Įtekėjimas į vamzdį
  </td><td colspan="12">Su aštriomis briaunomis: $\xi = 0,5$;
Su suapvalintomis briaunomis: $\xi = 0,2$</td></tr>
<tr><td>Ištekėjimas iš vamzdžio
 </td><td colspan="12">$\xi = 1,0$</td></tr>
<tr><td rowspan="5">Diafragma su aštriomis briaunomis tiesiame vamzdyje
 
d_0 = diafragmos angos skersmuo, m;
δ – diafragmos storis, m; w_0 – vidutinis greitis diafragmos angoje, m/s;
w – vidutinis greitis vamzdyje, m/s;
D – vamzdžio skersmuo, m;
$m = (d_0/D)^2$</td><td>m</td><td>0,02</td><td>0,04</td><td>0,06</td><td>0,08</td><td>0,1</td><td>0,12</td><td>0,14</td><td>0,16</td><td>0,18</td><td>0,20</td><td>0,22</td></tr>
<tr><td>ξ</td><td>7000</td><td>1670</td><td>730</td><td>400</td><td>245</td><td>165</td><td>117</td><td>86,0</td><td>65,5</td><td>51,5</td><td>40,0</td></tr>
<tr><td>m</td><td>0,24</td><td>0,26</td><td>0,28</td><td>0,30</td><td>0,34</td><td>0,4</td><td>0,5</td><td>0,6</td><td>0,7</td><td>0,8</td><td>0,9</td></tr>
<tr><td>ξ</td><td>32,0</td><td>26,8</td><td>22,3</td><td>18,2</td><td>13,1</td><td>8,25</td><td>4,00</td><td>2,00</td><td>0,97</td><td>0,42</td><td>0,13</td></tr>
<tr><td colspan="12"></td></tr>
<tr><td>Vamzdžio alkūnė</td><td>α</td><td>20°</td><td>30°</td><td>45°</td><td>60°</td><td>90°</td><td colspan="6"></td></tr>
<tr><td></td><td>ξ</td><td>0,12</td><td>0,16</td><td>0,32</td><td>0,56</td><td>1,19</td><td colspan="6"></td></tr>
</table>

VII lentelės tęsinys

<table>
<tr><th>Kliūties tipas</th><th colspan="11">Vietinės kliūties koeficiento vertė</th></tr>
<tr><td rowspan="6">Vamzdžio posūkis

d – vidinis vamzdyno skersmuo, m;
R_0 – vamzdžio posūkio spindulys, m</td><td colspan="11">Pasipriešinimo koeficientas $\xi = A \cdot B$</td></tr>
<tr><td colspan="11"></td></tr>
<tr><td>Kampas φ, laipsniais</td><td>20</td><td>30</td><td>45</td><td>60</td><td>90</td><td>110</td><td>130</td><td>150</td><td>180</td></tr>
<tr><td>A</td><td>0,31</td><td>0,45</td><td>0,6</td><td>0,78</td><td>1,0</td><td>1,13</td><td>1,20</td><td>1,28</td><td>1,40</td></tr>
<tr><td>R_0/d</td><td>1,0</td><td>2,0</td><td>4,0</td><td>6,0</td><td>15</td><td>30</td><td>50</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>B</td><td>0,21</td><td>0,15</td><td>0,11</td><td>0,09</td><td>0,06</td><td>0,04</td><td>0,03</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">Normalus čiaupas</td><td colspan="11">ξ vertės visiškai atsukus čiaupą:</td></tr>
<tr><td>D, mm</td><td>13</td><td>20</td><td>40</td><td>80</td><td>100</td><td>150</td><td>200</td><td>250</td><td>350</td></tr>
<tr><td>ξ</td><td>10,8</td><td>8,0</td><td>4,9</td><td>4,0</td><td>4,1</td><td>4,4</td><td>4,7</td><td>5,1</td><td>5,5</td></tr>
<tr><td rowspan="5">Tiesiakryptis čiaupas</td><td colspan="11">Kai $Re = \dfrac{w \cdot D \cdot \rho}{\mu} \geq 3 \cdot 10^5$, ξ nustatomas iš lentelės</td></tr>
<tr><td>D, mm</td><td>25</td><td>38</td><td>50</td><td>65</td><td>76</td><td>100</td><td>150</td><td>200</td><td>250</td></tr>
<tr><td>ξ</td><td>1,04</td><td>0,85</td><td>0,79</td><td>0,65</td><td>0,60</td><td>0,50</td><td>0,42</td><td>0,36</td><td>0,32</td></tr>
<tr><td colspan="11">Kai $Re < 3 \cdot 10^5$, pasipriešinimo koeficientas $\xi = \xi_1 \cdot K$. ξ_1. Jo vertė nustatoma kaip ir tada, kai $Re \geq 3 \cdot 10^5$; K vertės pateiktos lentelėje</td></tr>
<tr><td>Re</td><td>5 000</td><td>10 000</td><td>20 000</td><td>50 000</td><td>100 000</td><td>200 000</td><td>300 000</td></tr>
<tr><td>K</td><td>1,40</td><td>1,07</td><td>0,94</td><td>0,88</td><td>0,91</td><td>0,93</td><td>1</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Sklendė</td><td>Sąlyginis skersmuo, mm</td><td colspan="2">15–100</td><td colspan="2">175–200</td><td colspan="2">300 ir daugiau</td></tr>
<tr><td>ξ</td><td colspan="2">0,5</td><td colspan="2">0,25</td><td colspan="2">0,15</td></tr>
</table>

VII lentelės tęsinys

Kliūties tipas	Vietinės kliūties koeficiento vertė						
Staigus paplatėjimas 	$Re = \frac{w_0 \cdot d_{ekv} \cdot \rho}{\mu}$	F_0/F_1					
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
	10	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
	100	1,70	1,40	1,20	1,10	0,90	0,80
	1 000	2,0	1,60	1,30	1,05	0,90	0,60
	3 000	1,00	0,70	0,60	0,40	0,30	0,20
	3 500 ir daugiau	0,81	0,64	0,50	0,36	0,25	0,16
Staigus susiaurėjimas 	$Re = \frac{w_0 \cdot d_{ekv} \cdot \rho}{\mu}$	F_0/F_1					
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
	10	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
	100	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80
	1 000	0,64	0,50	0,44	0,35	0,30	0,24
	10 000	0,5	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20
	> 10 000	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20
F_0 – mažesniojo skerspjūvio plotas, m^2; w_0 – srauto greitis mažesniajame skerspjūvyje, m/s; F_1 – didesniojo skerspjūvio plotas, m^2;							

VIII lentelė. Vandeninių tirpalų, verdančių esant atmosferiniam slėgiui (0,1 MPa) ir nurodytoms temperatūroms, koncentracijos (masės %)

Ištirpinta medžiaga	Virimo temperatūra, °C																		
	101	102	103	104	105	107	110	115	120	125	140	160	180	200	220	240	260	280	300
$CaCl_2$	5,66	10,31	14,16	17,36	20,00	24,24	29,33	35,68	40,83	45,80	57,89	68,94	75,85	-	-	-	-	-	-
KOH	4,49	8,51	11,97	14,82	17,01	20,88	25,65	31,97	36,51	40,23	48,05	54,89	60,41	64,91	68,73	72,46	75,76	78,95	81,63
KCl	8,42	14,31	18,96	23,02	26,57	32,62	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K_2CO_3	10,31	18,37	24,24	28,57	32,24	37,69	43,97	50,86	56,04	60,40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
KNO_3	13,19	23,66	32,23	39,20	45,10	54,65	65,34	79,53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$MgCl_2$	4,67	8,42	11,66	14,31	16,59	20,32	24,41	29,48	33,07	36,02	38,61	-	-	-	-	-	-	-	-
$MgSO_4$	14,31	22,78	28,31	32,23	35,32	42,86	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaOH	4,12	7,40	10,15	12,51	14,53	18,32	23,08	26,21	33,77	37,58	48,32	60,13	69,97	77,53	84,03	88,89	93,02	95,92	98,47
NaCl	6,19	11,03	14,67	17,69	20,32	25,09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

VIII lentelės tęsinys

Ištirpinta medžiaga	Virimo temperatūra, °C																	
	101	102	103	104	105	107	110	115	120	125	140	160	180	200	220	240	260	280	300
$NaNO_3$	8,26	15,61	21,87	27,53	32,43	40,47	49,87	60,94	68,94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Na_2SO_4	15,26	24,81	30,73	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Na_2CO_3	9,42	17,22	23,72	29,18	33,86	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$CuSO_4$	26,95	39,98	40,83	44,47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$ZnSO_4$	20,00	31,22	37,89	42,92	46,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NH_4NO_3	9,09	16,66	23,08	29,08	34,21	42,53	51,92	63,24	71,26	77,11	87,09	93,20	96,00	97,61	98,84	-	-	-	-
NH_4Cl	6,10	11,35	15,96	19,80	22,89	28,37	35,98	46,95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$(NH_4)_2SO_4$	13,34	23,14	30,65	36,71	41,79	49,73	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

IX lentelė. Vamzdžių ekvivalentinio šiurkštumo vidutinės vertės

Vamzdžiai	Δe, mm
Nežymiai surūdiję, ištisiniai ir suvirinti plieniniai vamzdžiai	0,2
Seni, surūdiję plieniniai vamzdžiai	0,67 ir daugiau
Pokostuoti stoginės skardos vamzdžiai	0,125
Eksploatuoti ketaus vandentiekio vamzdžiai	1,4
Techniškai glotnūs aliumininiai vamzdžiai	0,015–0,06
Švarūs žalvariniai, variniai, švininiai ir stikliniai ištisiniai vamzdžiai	0,0015–0,01
Nutrinti lygaus paviršiaus betoniniai vamzdžiai	0,3–0,8
Šiurkštaus, rupaus paviršiaus betoniniai vamzdžiai	3–9
Vidutiniškai eksploatuoti naftotiekiai ir sočiųjų garų garotiekiai	0,2
Periodiškai veikiantys garotiekiai	0,5
Kompresoriumi suslėgto oro ortakiai	0,8
Periodiškai veikiantys kondensato nuvedimo vamzdžiai	1,0

X lentelė. Kietųjų medžiagų vidutinė savitoji šiluma, esant (0–100) °C temperatūrai

Medžiaga	Vidutinė savitoji šiluma, kJ/(kg·K)	Medžiaga	Vidutinė savitoji šiluma, kJ/(kg·K)
Akmens anglis	1,30	Magnio oksidas	0,92
Aliuminis	0,92	Margarinas	2,114–2,328
Asbestas	0,84	Mediena (pušis)	2,72
Betonas	1,13	Miltai	1,73
Bronza	0,385	Molis	0,92
Celiuliozė	1,55	Naftalinas	1,30
Cinkas	0,38	Parafinas	2,72
Cukrus (smulkus)	0,712	Plienas	0,50
Geležis	0,50	Plyta (raudona)	0,92
Guma	1,68	Plyta (ugniai atspari)	0,88–1,01
Jautiena (liesa)	3,35	Smėlis (sausas)	0,80
Kamštis	1,68	Stiklas	0,42–0,84
Kaolinas	0,92	Šlakas	0,75
Ketus	0,50	Švinas	0,13
Kiauliena (riebi)	2,18	Tekstolitas	1,47
Klintis, kalkės	0,92	Uoliena (lydyta)	0,84
Koksas	0,84	Varis	0,385
Krakmolas (bulvių)	1,089–1,214	Vilna	1,63
Kreida	0,88	Viniplastas	1,76
Kvarcas	0,80	Žalvaris	0,394

XI lentelė. Skysčių vidutinė savitoji šiluma

Skystis	Vidutinė savitoji šiluma, kJ/(kg·K)	Skystis	Vidutinė savitoji šiluma, kJ/(kg·K)
Aliejus (saulėgrąžų)	1,78	Fenolis	2,35
Alus	4,07	Heksanas	2,51
Alyva (mašininė)	1,68	Medus	2,43
Amoniakas	4,19	Nitrobenzenas	1,38
Azotas (skystas)	2,01	Sieros dioksidas	1,34
Azoto rūgštis	2,77	Terpentinas	1,76
Benzinas	1,84	Vynas (muskatinis)	3,61
Deguonis (skystas)	1,68	Žibalas	2,10

XII lentelė. Kietųjų medžiagų šilumos laidumo koeficiento λ vertės, esant (0–100) °C temperatūrai

Medžiaga	Tankis (birioms medžiagoms piltinis tankis), kg/m^3	λ, W/(m·K)
Asbestas	600	0,151
Betonas	2 300	1,28
Emalis	2 350	0,87–1,16
Kamštis smulkiagabalinis	160	0,047
Ledas	920	2,33
Magnio oksido milteliai, 85 %	216	0,070
Mediena (pušis)	600	0,140–0,174
Medienos pjuvenos	230	0,070..0,093
Mūras (įprastų plytų)	1 700	0,698–0,814
Mūras (izoliacinių plytų)	600	0,116–0,209
Mūras (ugniai atsparių plytų)	1 840	1,05
Nuoviros, vandens akmuo	-	1,16–3,49
Putplastis	30	0,047
Rūdys (nuodegos)	-	1,16
Smėlis (sausas)	1 500	0,349–0,814
Sovelitas	450	0,098
Stiklas	2 500	0,698–0,814
Stiklo vata	200	0,035–0,070
Aliuminis	2 700	203,5
Bronza	8 000	64,0
Ketus	7 500	46,5–93
Plienas	7 850	46,5
Plienas (nerūdijantis)	7 900	17,5
Švinas	11 400	34,9
Varis	8 800	384
Žalvaris	8 500	93,0

XIII lentelė. Skysčių ir vandens tirpalų šilumos laidumo koeficientų λ vertės

Ištirpinta medžiaga	Masės dalis, %	Temperatūra, °C	λ, W/(m·K)
NH_3	26	18	0,45
$BaCl_2$	21	32	0,58
KBr	40	32	0,50
KOH	21	32	0,58
	42	32	0,55
K_2SO_4	10	32	0,60
KCl	15	32	0,58
	30	32	0,56
$MgSO_4$	22	32	0,59
$MgCl_2$	11	32	0,58
	29	32	0,52
$CuSO_4$	18	32	0,58
NaBr	20	32	0,57
	40	32	0,54
Na_2CO_3	10	32	0,58
NaCl	12,5	32	0,58
	25	32	0,48
H_2SO_4	30	32	0,52
	60	32	0,44
	90	32	0,35
HCl	12,5	32	0,52
	25	32	0,48
	38	32	0,44
CH_3COOH	50	25	0,36
Aliejus (saulėgrąžų)	100	-20	0,172
	100	0	0,169
	100	20	0,167
Amoniakas (skystas)	100	0	0,541
	100	100	0,314
Dichloretanas	100	0	0,140
Acto rūgštis	50	0	0,314
	50	100	0,477
Chlorbenzenas	100	0	0,132
	100	100	0,113

XIV lentelė. Sočiųjų vandens garų slėgis, esant (-20–100) °C temperatūrai

t, °C	*p*, Pa	*t*, °C	*p*, Pa	*t*, °C	*p*, Pa	*t*, °C	*p*, Pa	*t*, °C	*p*, Pa
-20	102,91	5	871,78	30	4241,61	55	15729,40	80	47334,8
-19	113,31	6	934,43	31	4492,21	56	16502,54	81	49281,0
-18	124,64	7	1001,08	32	4753,48	57	17302,34	82	51307,1
-17	136,90	8	1073,07	33	5029,41	58	18142,13	83	53399,9
-16	150,36	9	1147,71	34	5318,67	59	19008,58	84	55559,4
-15	165,03	10	1227,69	35	5622,59	60	19915,02	85	57798,8
-14	180,89	11	1311,67	36	5939,85	61	20848,12	86	60104,9
-13	198,08	12	1402,32	37	6274,43	62	21834,54	87	62477,7
-12	216,88	13	1496,96	38	6618,35	63	22847,62	88	64930,4
-11	237,27	14	1598,27	39	6990,25	64	23900,69	89	67463,1
-10	259,40	15	1704,91	40	7374,16	65	24993,75	90	70089,1
-9	283,26	16	1816,88	41	7776,72	66	26140,13	91	72795,1
-8	309,39	17	1936,85	42	8197,95	67	27326,50	92	75581,1
-7	337,52	18	2063,48	43	8637,84	68	28552,86	93	78460,3
-6	368,04	19	2196,78	44	9099,06	69	29819,21	94	81432,9
-5	400,97	20	2338,08	45	9581,60	70	31152,21	95	84498,8
-4	436,69	21	2486,05	46	10084,1	71	32511,87	96	87658,0
-3	475,35	22	2643,34	47	10610,6	72	33938,18	97	90923,9
-2	517,07	23	2808,63	48	11158,5	73	35417,81	98	94283,0
-1	561,99	24	2983,25	49	11733,7	74	36950,76	99	97735,5
0	610,38	25	3167,21	50	12331,8	75	38537,03	100	101308
1	657,17	26	3360,49	51	12956,6	76	40176,62		
2	705,16	27	3564,44	52	13609,9	77	41869,53		
3	758,48	28	3779,06	53	14289,7	78	43629,09		
4	813,13	29	4004,33	54	14996,2	79	45455,30		

XV lentelė. Organinių skysčių fizikinės savybės

Skystis	Cheminė formulė	Molinė masė, kg/kmol	Tankis, kg/m^3	Virimo temperatūra, °C	Sočiųjų garų slėgis, Pa, esant 20 °C	Lydymosi temperatūra, °C
Acetonas	CH_3COCH_3	58,08	810	56	24794	-94,3
Anglies sulfidas	CS_2	76,13	1290	46,3	39723	-112
Anglies tetrachloridas	CCl_4	153,84	1630	76,7	12090	-22,8
Benzinas	-	-	690–760	70–120	-	-
Benzenas	C_6H_6	78,11	900	80,2	9998	5,5
Chloroformas	$CHCl_3$	119,38	1530	61,2	21328	-
Dichloretanas	$CH_2Cl\text{-}CH_2Cl$	98,97	1250	83,7	8665	-
Dietilo eteris	$C_2H_5OC_2H_5$	74,12	710	34,5	58919	-116,3
Etilacetatas	$CH_3COOC_2H_5$	88,10	900	77,15	9731	-83,6
Izopropilacetatas	$CH_3COOC_5H_{11}$	130,18	870	142,5	800	-
Ksilenai (mišinys)	$C_6H_4(CH_3)_2$	106,16	860	136–145	1333	-13–48
Metilacetatas	CH_3COOCH_3	74,08	930	57,5	22661	-
Propilacetatas	$CH_3COOC_3H_7$	102,13	890	101,6	3333	-
Alkoholiai						
butilo	C_4H_9OH	74,12	810	117,7	627	-90
etilo	C_2H_5OH	46,07	790	78,3	5865	-114,5
izoamilo	$C_5H_{11}OH$	88,15	810	132	293	-117
izobutilo	C_4H_9OH	74,12	800	108	1173	-108
izopropilo	C_3H_7OH	60,09	785	82,4	4319	-89
metilo	CH_3OH	32,04	800	64,7	12757	-98
propilo	C_3H_7OH	60,09	800	97,2	1933	-126
Terpentinas	$C_{10}H_{16}$	136,1	850–880	155–190	533	-
Toluenas	$C_6H_5CH_3$	92,13	870	110,8	2973	-95

XVI lentelė. Sočiųjų vandens garų savybės, esant skirtingoms temperatūroms

Temperatūra, °C	Absoliutinis slėgis, kPa	Savitasis tūris, m^3/kg	Tankis, kg/m^3	Skysčio entalpija h', kJ/kg	Garų entalpija h'', kJ/kg	Garų susidarymo šiluma r, kJ/kg
0	0,6082	206,5	0,00484	0	2493,1	2493
5	0,8731	147,1	0,00680	20,95	2502,7	2482
10	1,2263	106,4	0,00940	41,90	2512,3	2470
15	1,7069	77,9	0,01283	62,85	2522,4	2460
20	2,3348	57,8	0,01729	83,80	2532,0	2448
25	3,1686	43,40	0,02304	104,75	2541,7	2437
30	4,2477	32,93	0,03036	125,70	2551,3	2426
35	5,6211	25,25	0,03960	146,65	2561,0	2414
40	7,3771	19,55	0,05114	167,60	2570,6	2403
45	9,5844	15,28	0,06543	188,55	2579,8	2391
50	12,341	12,05	0,0830	209,50	2589,5	2380
55	15,745	9,589	0,1043	230,45	2598,7	2368
60	19,924	7,687	0,1301	251,40	2608,3	2357
65	25,016	6,209	0,1611	272,35	2617,5	2345
70	31,166	5,052	0,1979	293,30	2626,3	2333
75	38,553	4,139	0,2416	314,3	2636	2321
80	47,382	3,414	0,2929	335,2	2644	2310
85	57,879	2,832	0,3531	356,2	2653	2297
90	70,142	2,365	0,4229	377,1	2662	2285
95	84,562	1,985	05039	398,1	2671	2273
100	101,34	1,675	0,5970	419,0	2679	2260
105	120,86	1,421	0,7036	440,4	2687	2248
110	143,32	1,212	0,8254	461,3	2696	2234
115	169,12	1,038	0,9635	482,7	2704	2221
120	198,65	0,893	1,1199	504,1	2711	2207
125	232,20	0,772	1,296	525,4	2718	2194
130	270,27	0,6693	1,494	546,8	2726	2179
135	313,14	0,5831	1,715	568,2	2733	2165
140	361,50	0,5096	1,962	589,5	2740	2150
145	415,75	0,4469	2,238	611,3	2747	2125
150	476,28	0,3933	2,543	632,7	2753	2120
160	618,32	0,3075	3,252	654,1	2765	2089
170	792,65	0,2431	4,113	719,8	2776	2056

XVI lentelės tęsinys

Temperatūra, °C	Absoliutinis slėgis, kPa	Savitasis tūris, m^3/kg	Tankis, kg/m^3	Skysčio entalpija h', kJ/kg	Garų entalpija h'', kJ/kg	Garų susidarymo šiluma r, kJ/kg
180	1003,6	0,1944	5,145	763,8	2785	2021
190	1255,7	0,1568	6,378	808,3	2792	1984
200	1554,9	0,1276	7,840	852,7	2798	1945
210	1918,8	0,1045	9,567	897,9	2801	1904
220	2321,0	0,0862	11,60	943,2	2803	1860
230	2798,8	0,07155	13,98	989,3	2802	1813
240	3348,2	0,05967	16,76	1035	2799	1763
250	3978,0	0,04998	20,01	1082	2792	1710
260	4694,1	0,04199	23,82	1130	2783	1653
270	5504,4	0,03538	28,27	1178	2770	1593
280	6417,7	0,02988	33,47	1226	2754	1528
290	7443,8	0,02525	39,60	1275	2734	1459
300	8593,6	0,02131	46,93	1327	2710	1384
310	9878,7	0,01799	55,59	1380	2682	1302
320	11301	0,01516	65,95	1437	2650	1213
330	12881	0,01273	78,53	1498	2613	1117
340	14617	0,01064	93,98	1564	2571	1009
350	16540	0,00884	113,2	1638	2519	881
360	18668	0,00716	139,6	1730	2444	714
370	21042	0,00585	171,0	1890	2304	412
374	22073	0,00310	322,6	2100	2100	0

XVII lentelė. Sočiųjų vandens garų savybių priklausomybė nuo slėgio

Absoliutusis slėgis, kPa	Temperatūra, °C	Savitasis tūris, m^3/kg	Tankis, kg/m^3	Skysčio entalpija h', kJ/kg	Garų entalpija h'', kJ/kg	Garų susidarymo šiluma r, kJ/kg
0,9810	6,6	131,60	0,00760	27,7	2506	2478
1,4715	12,7	89,64	0,01116	53,2	2518	2465
1,9620	17,1	68,27	0,01465	71,6	2526	2455
2,4525	20,7	55,28	0,01809	86,7	2533	2447
2,9430	23,7	46,53	0,02149	99,3	2539	2440
3,9240	28,6	35,46	0,02820	119,8	2548	2429
4,9050	32,5	28,73	0,03481	136,2	2556	2420
5,8860	35,8	24,19	0,04133	150,0	2562	2413
7,8480	41,1	18,45	0,05420	172,2	2573	2400
9,8100	45,4	14,96	0,06686	190,2	2581	2390
11,772	49,0	12,60	0,07937	205,3	2588	2382
14,715	53,6	10,22	0,09789	224,6	2596	2372
19,620	59,7	7,977	0,1283	250,1	2607	2358
29,430	68,7	5,331	0,1876	287,9	2620	2336
39,240	75,4	4,072	0,2456	315,9	2632	2320
49,050	80,9	3,304	0,3027	339,0	2642	2307
58,860	85,5	2,785	0,3590	358,2	2650	2296
68,670	89,3	2,411	0,4147	375,0	2657	2286
78,480	93,0	2,128	0,4699	389,7	2663	2278
88,290	96,2	1,906	0,5246	403,1	2668	2270
98,100	99,1	1,727	0,5790	415,2	2677	2264
117,72	104,2	1,457	0,6865	437,0	2686	2249
137,34	108,7	1,261	0,7931	456,3	2693	2237
156,96	112,7	1,113	0,898	473,1	2703	2227
176,58	116,3	0,997	1,003	483,6	2709	2217
196,20	119,6	0,903	1,107	502,4	2710	2208
294,30	132,9	0,6180	1,618	558,9	2730	2171
392,40	142,9	0,4718	2,120	601,1	2744	2141
490,50	151,1	0,3825	2,614	637,7	2754	2117
588,60	158,1	0,3222	3,104	667,9	2768	2095
686,70	164,2	0,2785	3,591	694,3	2769	2075
784,80	169,6	0,2454	4,075	718,4	2776	2057
882,90	174,5	0,2195	4,536	740,0	2780	2040
981,00	179,0	0,1985	4,037	759,6	2784	2024

XVII lentelės tęsinys

Absoliutusis slėgis, kPa	Temperatūra, °C	Savitasis tūris, m^3/kg	Tankis, kg/m^3	Skysčio entalpija h', kJ/kg	Garų entalpija h'', kJ/kg	Garų susidarymo šiluma r, kJ/kg
1079,1	183,2	0,1813	5,516	778,1	2787	2009
1177,2	187,1	0,1668	5,996	795,3	2790	1995
1275,3	190,7	0,1545	6,474	811,2	2793	1984
1373,4	194,1	0,1438	6,952	826,7	2795	1968
1471,5	197,4	0,1346	7,431	840,9	2796	1956
1569,6	200,4	0,1264	7,909	854,8	2798	1943
1667,7	203,4	0,1192	8,389	867,7	2799	1931
1765,8	206,2	0,1128	8,868	880,3	2800	1920
1863,9	208,8	0,1070	9,349	892,5	2801	1909
1962,0	211,4	0,1017	9,83	904,2	2802	1898
2943,0	232,8	0,06802	14,70	1002	2801	1800
3924,0	249,2	0,05069	19,73	1079	2793	1715
4905,0	262,7	0,04007	24,96	1143	2780	1637
5886,0	274,3	0,03289	30,41	1199	2763	1565
6867,0	284,5	0,02769	36,12	1249	2746	1497
7848,0	293,6	0,02374	42,13	1294	2726	1432
8829,0	301,9	0,02064	48,45	1337	2705	1369
9810,0	309,5	0,01815	55,11	1377	2684	1306
11772	323,1	0,01437	69,60	1455	2638	1183
13734	335,0	0,01164	85,91	1531	2592	1061
15696	345,7	0,00956	104,6	1606	2540	934
17658	355,4	0,00782	128,0	1684	2483	799
19620	364,2	0,00614	162,9	1783	2400	617
22073	374,0	0,00310	322,6	2100	2100	0

XVIII lentelė. *SI* ir kitų sistemų matavimo vienetų tarpusavio priklausomybė

Fizikinis dydis	*SI* sistemos matavimo vienetas	Priklausomybė tarp *SI* bei kitų dažniausiai naudojamų sistemų bei nesisteminių vienetų
1	2	3
Ilgis	m	1 mkm = 10^{-6} m
		1 Å = 10^{-10} m
		1 ft = 0,3048 m
		1 in = 24,5·10^{-3} m
Masė	kg	1 lb = 0,454 kg
Temperatūra	K	t °C = (t + 273,15) K
		T °F = [5·(t–32)/9+273,15] K
Plokščias kampas	rad	1° = π/180 rad
		1′ = π/10 800 rad
		1 aps = 2π rad = 6,28 rad
Jėga	N	1 kgf = 9,81 N
		1 dyn = 10^{-5} N
		1 lbf = 4,45 N
Dinaminė klampa	Pa·s	1 dyn·s/cm^2 = 0,1 Pa·s
		1 cP = 1/9180 kgf·s/m^2 = 10^{-3} Pa·s = = 1 mPa·s
		1lbx·s/ft^2 = 47,88 Pa·s
Kinematinė klampa	m^2/s	1 St = 1 cm^2/s = 10^{-4} m^2/s
		1 ft^2/s = 0,093 m^2/s
		1 ft^2/h = 25,81 m^2/s
Slėgis	Pa	1 bar = 10^5 Pa
		1 mbar = 100 Pa
		1 dyn/cm^2 = 1 μbar = 0,1 Pa
		1 kgf/cm^2 = 1 at = 9,81·10^4 Pa = = 735 mm Hg
		1 kgf/m^2 = 9,81 Pa
		1 mm H_2O = 9,81 Pa
		1 mm Hg = 133,3 Pa
		1 lbf/in^2 = 6895 Pa
		1 lbf/ft^2 = 47,88 Pa
Difuzijos koeficientas	m^2/s	1 ft^2/s = 0,0929 m^2/s
Galia	W	1 kgf·m/s = 9,81 W
		1 erg/s = 10^{-7} W
		1 kcal/h = 1,163 W
		1 lbf·ft/s = 1,356 W
Paviršiaus įtemptis	N/m	1 kgf/m = 9,81 J/m^2
		1 erg/cm^2 = 1 dyn/cm = 10^{-3} J/m^2 = = 10^{-3} N/m

XVIII lentelės tęsinys

Tūris	m^3	1 ft^3 = 28,3 dm^3 = 2,83·10^{-2} m^3
		1 in^3 = 16,387 cm^3 = 16,39·10^{-6} m^3
		1 l = 1 dm^3 = 10^{-3} m^3
		1 ml = 1 cm^3 = 10^{-6} m^3
Specifinis tūris	m^3/kg	1 dm^3/kg = 1 cm^3/g = 10^{-3} m^3/kg
Tankis	kg/m^3	1 t/m^3 = 1 kg/dm^3 = 1 g/cm^3 = 10^3 kg/m^3
		1 kgf·s^2/m^4 = 9,81 kg/m^3
		1 lb/ft^3 = 16,02 kg/m^3
		1 lb/in^3 = 27,68·10^3 kg/m^3
Šilumos srauto tankis	W/m^2	1 kcal/(m^2·h) = 1,163 W/m^2
Plotas	m^2	1 ft^2 = 0,0929 m^2
		1 in^2 = 6,451·10^{-4} m^2
		1 mm^2 = 10^{-6} m^2
Darbas, energija, šilumos kiekis	J	1 kgf·m = 9,81 J
		1 erg = 10^{-7} J
		1 kW·h = 3,6·10^6 J
		1 kcal = 4,187·10^3 J = 4,19 kJ
		1 lbf·ft = 1,356 J
		1 lbf·in = 0,113 J
		1 BTU = 1055 J
Masės debitas	kg/s	1 lb/s = 0,454 kg/s
		1 lb/h = 1,26·10^{-4} kg/s
Tūrio debitas	m^3/s	1 l/min = 16,67·10^{-6} m^3/s
		1 ft^3/s = 28,3·10^{-3} m^3/s
		1 in^3/s = 16,4·10^{-6} m^3/s
Linijinis greitis	m/s	1 ft/s = 0,3048 m/s
Kampinis greitis	rad/s	1 min^{-1} = π/30 rad/s
		1 aps/s = 2π rad/s
Savitoji šiluma	J/(kg·K)	1 kcal/(kg·°C) = 4,19 kJ/(kg·K)
		1 erg/(g·K) = 10^{-4} J/(kg·K)
		1 BTU/(lb·deg F) = 4,19 kJ/(kg·K)
Šilumos atidavimo (perdavimo) koeficientas	$W/(m^2·K)$	1 kcal/(m^2·h·°C) = 1,163 $W/(m^2·K)$
		1 BTU/(ft^2·h·deg F) = 5,6 $W/(m^2·K)$
Šilumos laidumo koeficientas	W/(m·K)	1 kcal/(m·h·°C) = 1,163 W/(m·K)
		1 BTU/(ft·h·deg F) = 1,73 W/(m·K)
Linijinis pagreitis	m/s^2	1 in/s^2 = 25,4·10^{-3} m/s^2
		1 ft/s^2 = 0,3048 m/s^2
Dažnis	Hz	1 Hz = 1 s^{-1} = 60 min^{-1}
Entalpija	J/kg	1 kcal/kg = 1 cal/g = 4,19 kJ/kg
		1 BTU/lb = 2326 J/kg
Entropija	J/(kg·K)	1 kcal/(kg·°C) = 4,19 kJ/(kg·K)
		1 BTU/(lb·deg F) = 4,19 kJ/(kg·K)

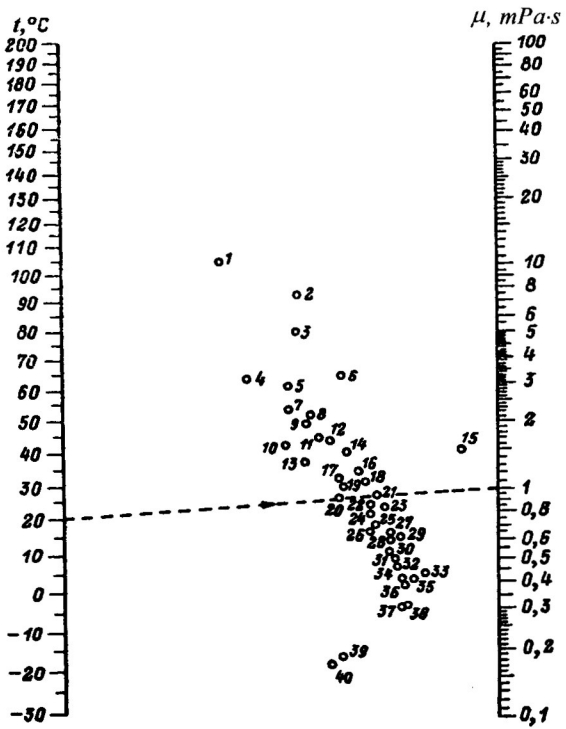
XIX lentelė. Ugniai atsparių ir šilumą izoliuojančių medžiagų šilumos laidumo koeficiento λ priklausomybė nuo temperatūros

Medžiagos	Tankis ρ, kg/m^3	Leistina darbo temperatūra, °C	λ, W/(m·K)
Anglingos	1350–1600	2000	23,2+0,00035·t
Chromomagnezitinės	2900	1750	2,0–0,00035·t
Chromomagnezitinės (termiškai atsparios)	3000	1750	2,8–0,00098·t
Chromomagnezitinės (termiškai atsparios)	3300	1750	3,5–0,00058·t
Daugiaaliuminatinės plytos	2500	1900	2,1–0,00062·t
Daugiaaliuminatinės plytos	2200	1600	1,52–0,00018·t
Daugiaaliuminatinės plytos	1330	1450	0,66+0,00008·t
Diatomitinės	1100	900	0,27+0,00023·t
Diatomitinės	750	900	0,17+0,00035·t
Diatomitinis užpildas	500	700	0,10+0,00028·t
Dinaso	1900	1650–1700	1,07+0,00093·t
Dinaso	1900	1650–1700	0,81+0,00076·t
Dinaso	1100	1500	0,58+0,00043·t
Forsteritinės	3000	1800	3,3–0,00110·t
Karborundinės	2000–2500	1400–1500	5,2–0,00130·t
Keraminės plytos	1800	700	0,47+0,00051·t
Korundinės	2600–2900	1600–1700	2,1+0,00215·t
Magnezitinės	2600–2700	1650–1750	6,2–0,00270·t
Magnezitinės	2600–2700	1650–1750	4,6–0,00120·t
Magnezitochromitinės	2700–2900	1750	4,0–0,00082·t
Mulitinės	2200–2900	1750	2,96–0,00110·t
Periklazošpinelinės	3000	1750	2,5–0,00058·t
Silimanitinės	2200–2600	1650	1,66–0,00018·t
Šamotinės	>1900	1350–1500	1,04+0,00015·t
Šamotinės	1900	1350–1500	0,70+0,00064·t
Šamotinės	1300	1300	0,61+0,00018·t
Šamotinės	1000	1250	0,28+0,00023·t
Šamotinės	800	1200	0,21+0,00043·t
Šamotinis užpildas	1000	1000	0,23+0,00049·t
Šlako vata	300	700	0,06+0,00035·t
Vidutinio rūgštingumo plytos	1800	1250–1400	0,85+0,00040·t

XX lentelė. Perkaitintų vandens garų vidutinė specifinė šiluma, atskaityta nuo soties temperatūros c_{pm}, kJ/(kg·K)

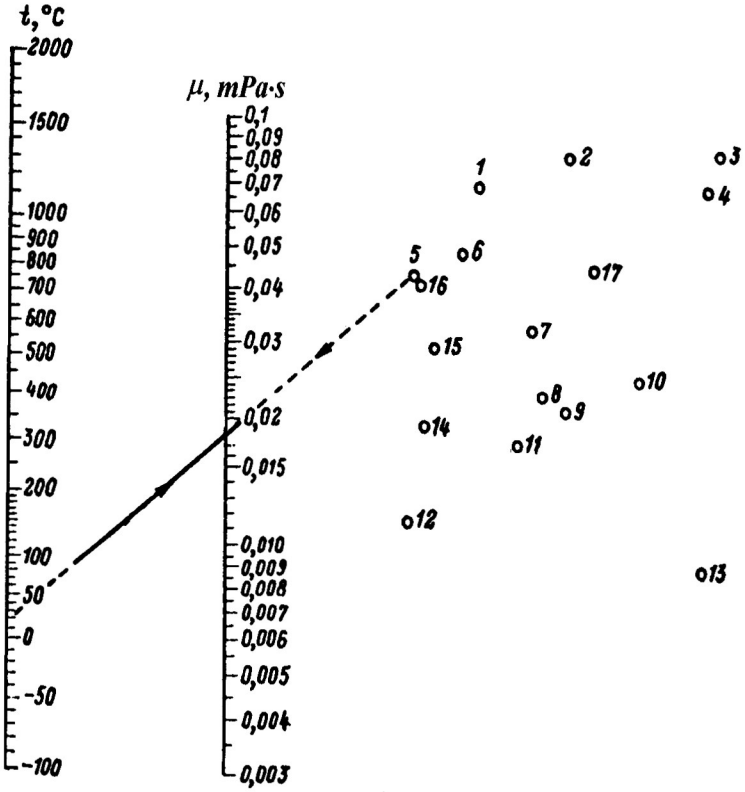
T, K / p, MPa	393	433	473	533	573	593	633	673	733	773	833	873
0,098	2,043	1,993	1,985	1,985	1,989	1,993	1,997	2,006	2,022	2,031	2,047	2,060
0,981	–	–	2,416	2,294	2,261	2,244	2,219	2,206	2,194	2,190	2,190	2,194
1,961	–	–	–	2,621	2,525	2,487	2,424	2,378	2,341	2,324	2,307	2,299
2,942	–	–	–	2,968	2,801	2,734	2,634	2,558	2,487	2,454	2,416	2,399
3,923	–	–	–	3,483	3,136	3,027	2,851	2,742	2,634	2,579	2,525	2,499
4,903	–	–	–	–	3,467	3,299	3,090	2,931	2,776	2,705	2,633	2,596
5,884	–	–	–	–	3,848	3,655	3,345	3,128	2,927	2,834	2,738	2,692
7,845	–	–	–	–	5,054	4,563	3,948	3,580	3,253	3,115	2,964	2,893
9,807	–	–	–	–	–	5,719	4,719	4,111	3,622	3,421	3,207	3,111
11,768	–	–	–	–	–	–	5,694	4,773	4,048	3,764	3,479	3,345
13,729	–	–	–	–	–	–	7,192	5,593	4,547	4,162	3,781	3,605
15,691	–	–	–	–	–	–	9,659	6,716	5,158	4,631	4,128	3,902
17,652	–	–	–	–	–	–	–	8,336	5,949	5,221	4,555	4,262
19,613	–	–	–	–	–	–	–	11,007	7,063	6,016	5,112	4,727
21,575	–	–	–	–	–	–	–	17,212	9,140	7,453	6,092	5,535

NOMOGRAMOS



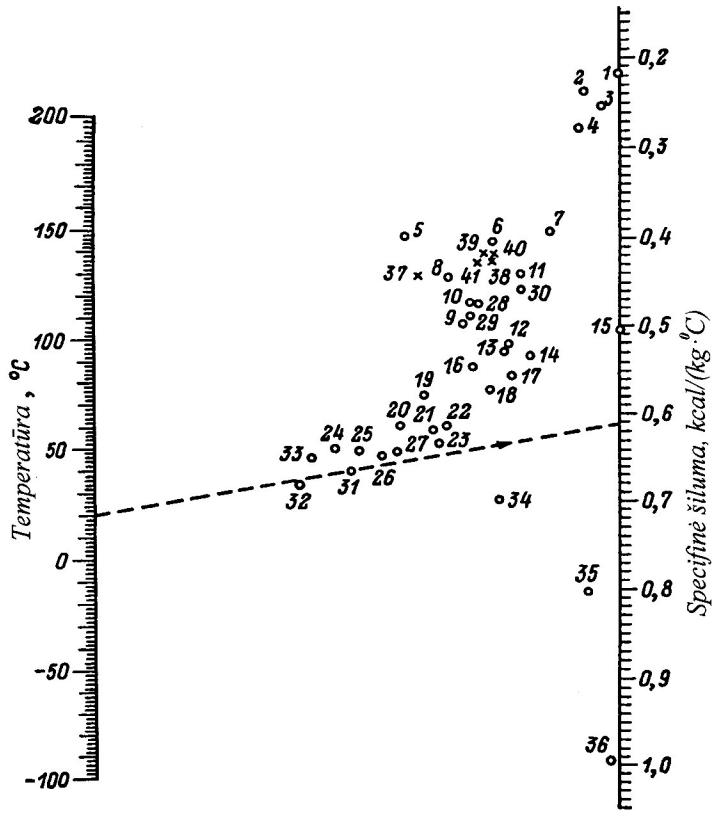
I pav. Įvairios temperatūros skysčių dinaminės klampos μ nustatymo nomograma

Skystis	Taško Nr.
Acetonas	34
Acto rūgštis, 100 %	18
Acto rūgštis, 70 %	12
Amilo alkoholis	17
Amoniakas	39
Anglies dioksidas	40
Anglies sulfidas	33
Anilinas	8
Benzenas	25
Butanolis	11
Chlorbenzenas	22
Chloroformas	29
Dietilo eteris	37
Etilacetatas	30
Etilenchloridas	23
Etilengliukolis	4
Etanolis, 100 %	19
Etanolis, 49 %	10
Fenolis	5
Gyvsidabris	15
Glicerinas, 100 %	1
Glicerinas, 50 %	7
Heksanas	36
Heptanas	31
Metilacetatas	32
Metanolis, 100 %	26
Metanolis, 90 %	24
Metanolis, 30 %	13
Naftalinas	9
Nitrobenzenas	14
Oktanas	28
Pentanas	38
Sieros rūgštis, 111 %	2
Sieros rūgštis, 98 %	3
Sieros rūgštis, 60 %	6
Sieros trioksidas	35
Terpentinas	16
Toluenas	27
Vanduo	20



II pav. Įvairios temperatūros dujų dinaminės klampos μ nustatymo nomograma, kai $P_0 = 101325$ Pa

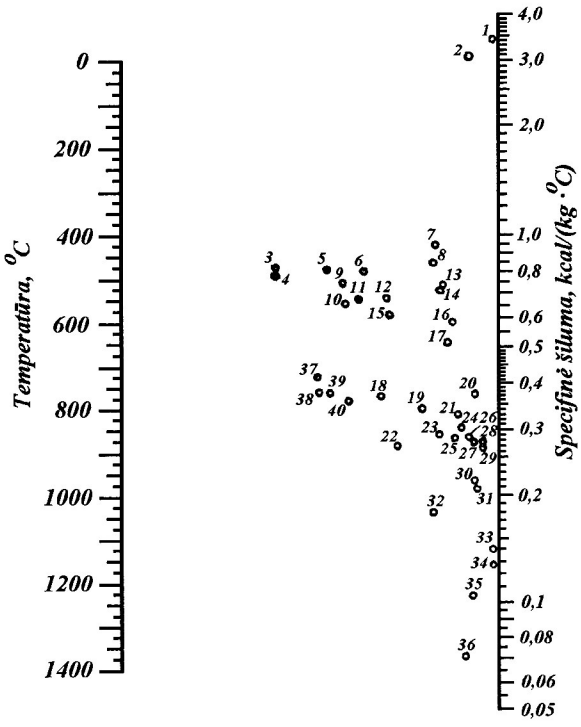
Medžiaga	Taško Nr.
Amoniakas	10
Anglies dioksidas	3
Anglies monoksidas	16
Azotas	6
Azoto monoksidas	2
Benzenas	13
Cloras	17
Deguonis	1
Druskos rūgštis	4
Etanas	11
Metanas	8
Oras	5
Sieros dioksidas	7
Vandenilis	12
Vanduo	9
$3H_2 + N_2$	15
$9H_2 + N_2$	14



III pav. Skysčių savitosios šilumos nustatymo nomograma

Medžiaga	Taško Nr.
Acetonas	18
Acto rūgštis, 100 %	16
Amilacetatas	12
Anglies sulfidas	4
Anglies tetrachloridas	2
Anilinas	14
Benzenas	29
Butanolis	24
Chlorbenzenas	6
Chloroformas	3
Dietilo eteris	17
Difenilas	8
Druskos rūgštis, 30 %	26
Etilacetatas	13
Etilbromidas	1
Etilchloridas	11
Etilengliukolis	22
Etiljodidas	5
Etanolis	31
Glicerinas	21
Heptanas	18
Izobutanolis	33
Izopentanas	20
Izopropanolis (-50…0) °C	27
Izopropanolis (0…50) °C	32
Kalcio chloridas, 25 %	34
Metilo alkoholis	23
Natrio chloridas, 25 %	35
p-Ksiloenas	10
o- ir *m*-Ksiloenas	9
Oktanas	15
Propanolis	25
Sieros rūgštis, 100 %	7
Toluenas (-60…40) °C	28
Toluenas (40…100) °C	30
Vanduo	36

kcal/(kg·°C) = 4,19 kJ/(kg·K)



IV pav. Dujų ir garų savitosios šilumos nustatymo nomograma, esant atmosferiniam slėgiui

Dujos arba garai	Temperatūrų intervalas, °C		Taško Nr.
	nuo	iki	
Acetilenas	0	200	*10*
Acetilenas	200	400	*15*
Acetilenas	400	1400	*16*
Amoniakas	0	600	*12*
Amoniakas	600	1400	*14*
Anglies dioksidas	0	400	*18*
Anglies dioksidas	400	1400	*24*
Anglies monoksidas	0	1400	*26*
Azotas	0	1400	*26*
Azoto oksidas	0	700	*25*
Azoto oksidas	700	1400	*28*
Bromo vandenilis	0	1400	*35*
Chloras	0	200	*32*
Chloras	200	1400	*34*
Chloro vandenilis	0	1400	*30*
Deguonis	0	600	*1*
Deguonis	600	1400	*2*
Deguonis	0	500	*23*
Deguonis	500	1400	*29*
Etanas	0	200	*3*
Etanas	200	600	*9*
Etanas	600	1400	*8*
Etilenas	0	200	*4*
Etilenas	200	600	*11*
Etilenas	600	1400	*13*
Fluoro vandenilis	0	1400	*20*
Freonas-11	0	150	*38*
Freonas-113	0	150	*40*
Freonas-21	0	150	*39*
Jodo vandenilis	0	1400	*36*
Metanas	0	300	*5*
Metanas	300	700	*6*
Metanas	700	1400	*7*
Oras	0	1400	*27*
Sieros garai	300	1400	*33*
Sieros dioksidas	0	400	*22*
Sieros dioksidas	400	1400	*31*
Sieros vandenilis	0	700	*19*
Sieros vandenilis	700	1400	*21*
Vandens garai	0	1400	*17*

LITERATŪRA

1. **Balandis A., Kantautas A., Leskauskas B., Vaickelionis G., Valančius Z.** Chemijos inžinerija. I knyga. – Kaunas: Technologija, 2006. – 473 p.
2. **Balandis A., Leskauskas B., Šinkūnas S., Vaickelionis G., Valančius Z.** Chemijos inžinerija. II knyga. – Kaunas: Technologija, 2007. – 533 p.
3. **Balandis A., Leskauskas B., Vaickelionis G., Valančius Z.** Chemijos inžinerija. Skaičiavimų pavyzdžiai ir uždaviniai. – Kaunas: Technologija, 2000. – 408 p.
4. **Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А.** Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. 12-е изд., перераб. и доп. – Москва: Альянс, 2005. – 576 с.
5. **Романков П. Г., Фролов В. Ф., Флисюл О. М., Курочкина М. И.** Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (Примеры и задачи). – Санкт-Петербург: Химия, 1993. – 495 с.
6. **Coulson J. M. & Richardson J. F.** Chemical Engineering. Volume 6. Chemical Engineering design, Published 1999.
7. **McCabe W. L., Smith J. C., Harriott P.** Unit operations of chemical engineering. Fourth Edition, 3 rd Printing 1986.

Spausdinti rekomendavo KTU Cheminės technologijos fakulteto studijų programų komitetas

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
SILIKATŲ TECHNOLOGIJOS KATEDRA

Alfredas BALANDIS, Benonas LESKAUSKAS,
Giedrius VAICKELIONIS, Zenonas VALANČIUS

CHEMIJOS INŽINERIJA

III knyga

Mokomoji knyga

Redagavo V. Baršys
Maketavo G. Vaickelionis

SL 344. 2010-04-16. 11,25 leidyb. apsk. l. Tiražas 100 egz.
Kaina sutartinė. Užsakymas 263.
Išleido leidykla „Technologija", K. Donelaičio g. 73, 44029 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija" spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas